



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU



ANÁLISE DE ENERGIA PARA UM CICLO ORGÂNICO DE RANKINE (ORC) UTILIZANDO DIFERENTES FLUÍDOS DE TRABALHO

ANELIZE TERRONI TEIXEIRA

BAURU - SP

2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU



ANÁLISE DE ENERGIA PARA UM CICLO ORGÂNICO DE RANKINE (ORC) UTILIZANDO DIFERENTES FLUÍDOS DE TRABALHO

Anelize Terroni Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Santiago Del Rio Oliveira

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

BAURU - SP

2021

Terroni Teixeira, Anelize.

Análise de emergência para um ciclo orgânico de Rankine (ORC) utilizando diferentes fluidos de trabalho / Anelize Terroni Teixeira, 2021.
178 f.

Orientador: Santiago Del Rio Oliveira

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Emergência. 2. Ciclo orgânico de Rankine (ORC). 3. Fluidos Orgânicos. 4. Life Cycle. 5. R134a. 6. NH₃ I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANELIZE TERRONI TEIXEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de fevereiro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANELIZE TERRONI TEIXEIRA, intitulada **ANÁLISE DE EMERGIA PARA UM CICLO ORGÂNICO DE RANKINE (ORC) UTILIZANDO DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GUSTAVO RODRIGUES DE SOUZA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciência Térmicas e dos Fluidos / Universidade Federal de São João del Rei, Prof. Dr. DELSON LUIZ MODOLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: **APROVADA** . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA



"Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muito, nos aproxima".

Louis Pasteur

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela ajuda para superar cada uma das dificuldades que surgiram ao longo dos anos dedicados a este trabalho e principalmente pela oportunidade de ter realizado este projeto, o qual representa um sonho realizado.

A universidade UNESP – Campus Bauru, por toda infraestrutura fornecida para que este projeto fosse finalizado.

Agradeço também ao Professor Dr. Santiago Del Rio Oliveira, por todo conhecimento, ajuda, dedicação e tempo cedidos para me ajudar até a conclusão desta dissertação. Pessoa fundamental em cada etapa do projeto, no direcionamento para solução dos problemas e por ter me exigido sabendo do meu potencial e da minha capacidade de entrega.

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todos os momentos, me deram forças nos períodos mais difíceis me auxiliando a seguir em frente, sofreram comigo e também comemoram comigo, sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Aos amigos que durante este processo me passaram calma e paciência, me apoiaram e me ajudaram a levar as responsabilidades de forma mais leve, uns mais de perto outros mais de longe, mas que sempre se apresentaram com palavras de incentivo, me ajudando a superar cada desafio que a pós-graduação me pôs e por sempre terem acreditado em mim.

A CAPES pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa através da bolsa 88882.432820/2019-01.

RESUMO: A análise de energia vem sendo utilizada nos últimos anos para medir os impactos ambientais e econômicos associados à produção de algum tipo de energia ou produto. Uma análise tradicional de energia é dividida em três fases. Primeiro, a contabilização em termos de unidade e transformada de todos os materiais utilizados na manufatura do fluido de trabalho e dos equipamentos do ciclo; Segundo, os insumos necessários para a operação do ciclo termodinâmico, no caso desta pesquisa, calor residual; Terceiro, os insumos necessários para transportar todos os equipamentos do ciclo para suas respectivas destinações, ao final do ciclo de vida da usina. Neste trabalho, resultados da análise de energia foram comparados para diferentes fluidos orgânicos de trabalho aplicados a diferentes ciclos orgânicos de Rankine (ORC) a fim de ranquear cada um dos sistemas em termos de sustentabilidade a curto, médio e longo período de acordo com o *EIS* (índice emergético de sustentabilidade – “Emergy Index of Sustainability”). Para tal, o software EES (engineering equation solver) foi utilizado para obter os parâmetros termodinâmicos para cada fluido de trabalho em seu respectivo ciclo ORC. Todos os insumos utilizados nas três fases da análise emergética são contabilizados para obter o *EIS*. Um novo método de cálculo para obter as massas dos componentes do ciclo ORC foi apresentado a fim de considerar as irreversibilidades do sistema. R134a e NH₃ foram classificados como sustentável por um médio período em todos os ciclos analisados. Esses resultados mostraram que a análise emergética pode ser utilizada como um método adicional para a seleção de ciclos ORC.

PALAVRAS-CHAVE: Energia, ciclo orgânico de Rankine, fluidos orgânicos, life cycle, R134a, NH₃.

ABSTRACT: Emergy analysis has been used in recent years to measure environmental and economic impacts associated a production of some form of energy or product. A traditional emergy analysis is divided in three phases. First, all materials required to manufacture the system components are measured in terms of unit and transformity; Second, the necessary inputs to operate the thermodynamic cycle are considered, and third, the inputs necessary to transport all components of system. In this paper, results of an emergy analysis in two different organic fluids, considering each of them with and without irreversibility, were compared to determine the performance for each ORC and to rank it in a scale of short, medium and long-term sustainability, according to EIS (Emergy Index of Sustainability). As such, EES (engineering equation solver) was used to get the thermodynamics parameters for each ORC working fluid; all inputs used along the three phases of emergy analyses had been added to obtain the EIS. A new calculation method to obtain the masses of the components of the ORC cycle was presented in order to consider the system irreversibility. R134a and NH₃ were classified as sustainable on medium term for all cycles. These results show that emergy analysis can be used as an additional method for selecting an ORC.

KEY-WORDS: Emergy, Organic Rankine Cycle (ORC), organic working fluids, life cycle, R134a, NH₃.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MUDANÇAS NO CLIMA AO LONGO DO TEMPO	1
1.2 – O CICLO ORGÂNICO DE RANKINE	2
1.3 – TIPOS DE ANÁLISES DE CICLOS TERMODINÂMICOS	4
1.4 – ANÁLISES DE CICLO DE VIDA E EMERGIA	6
1.5 – OBJETIVO	11
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA	13
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM FÍSICA	26
3.1 – ANÁLISE TERMODINÂMICA	26
3.1.1 – Ciclo ORC reversível	26
3.1.1.1 – Evaporador	27
3.1.1.2 – Turbina	28
3.1.1.3 – Condensador	28
3.1.1.4 – Bomba	29
3.1.2 – Ciclo ORC irreversível	30
3.1.2.1 – Turbina	31
3.1.2.2 – Bomba	32
3.1.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	33
3.1.3.1 – Evaporador	34
3.1.3.2 – Turbina de primeiro estágio	35
3.1.3.3 – Turbina de segundo estágio	35
3.1.3.4 – Condensador	36
3.1.3.5 – Bomba	37
3.1.3.6 – Aquecedor de alimentação fechado	37
3.1.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	39
3.1.4.1 – Turbina de primeiro estágio	40
3.1.4.2 – Turbina de segundo estágio	41

3.1.4.3 – Bomba	42
3.2 – MASSA DOS COMPONENTES DO CICLO	43
3.2.1 – Evaporador, condensador e aquecedor de alimentação fechado	43
3.2.2 – Turbina e bomba	44
3.2.3 – Massa do fluido de trabalho	44
3.3 – ANÁLISE EMERGÉTICA	44
3.3.1 – Janela ambiental/Análise de ciclo de vida	45
3.3.2 – Contabilização da emergia	46
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	48
4.1 – FLUXOGRAMA	48
4.2 – VALIDAÇÃO DO MÉTODO	49
4.2.1 – Análise termodinâmica	50
4.2.2 – Análise Emergética	54
4.2.2.1 – Fase de Construção	55
4.2.2.2 – Fase de Operação	57
4.2.2.3 – Fase de Desativação	59
4.2.2.4 – Produto Final	60
4.2.3 – Comparação de resultados	64
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	65
5.1.1 – Ciclo ORC Reversível	65
5.1.2 – Ciclo ORC Irreversível	67
5.1.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	69
5.1.4– Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	71
5.2 – MASSA DOS COMPONENTES DO CICLO	74
5.2.1 – Ciclo ORC reversível	74
5.2.2 – Ciclo ORC irreversível	75
5.2.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	76
5.2.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	77

5.3 – DADOS EMERGÉTICOS	78
5.3.1 – Ciclo ORC reversível	79
5.3.1.1 – Fase de construção	79
5.3.1.2 – Fase de operação	83
5.3.1.3 – Fase de desativação	84
5.3.1.4 – Produto Final	85
5.3.1.5 – Índices Emergéticos derivados	87
5.3.2 – Ciclo ORC irreversível	90
5.3.2.1 – Fase de construção	90
5.3.2.2 – Fase de operação	93
5.3.2.3 – Fase de desativação	94
5.3.2.4 – Produto Final	95
5.3.2.5 – Índices Emergéticos derivados	96
5.3.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	97
5.3.3.1 – Fase de construção	97
5.3.3.2 – Fase de operação	100
5.3.3.3 – Fase de desativação	101
5.3.3.4 – Produto Final	102
5.3.3.5 – Índices Emergéticos derivados	103
5.3.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	105
5.3.4.1 – Fase de construção	105
5.3.4.2 – Fase de operação	108
5.3.4.3 – Fase de desativação	109
5.3.4.4 – Produto Final	110
5.3.4.5 – Índices Emergéticos derivados	111
5.4 – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	113
5.5 – NOVO MÉTODO	115
5.5.1 – Consideração 1	116
5.5.1.1 – Ciclo ORC irreversível	116
5.5.1.2 – Fase de construção	118
5.5.1.3 – Fase de operação	121

5.5.1.4 – Fase de desativação	122
5.5.1.5 – Produto Final	123
5.5.1.6 – Índices Emergéticos derivados	124
5.5.2 – Consideração 2	126
5.5.2.1 – Ciclo ORC irreversível	126
5.5.2.2 – Fase de construção	129
5.5.2.3 – Fase de operação	131
5.5.2.4 – Fase de desativação	132
5.5.2.5 – Produto Final	133
5.5.2.6 – Índices Emergéticos derivados	134
5.5.3 – Consideração 2 e 3	136
5.5.3.1 – Ciclo ORC irreversível	136
5.5.3.2 – Fase de construção	139
5.5.3.3 – Fase de operação	142
5.5.3.4 – Fase de desativação	143
5.5.3.5 – Produto Final	144
5.5.3.6 – Índices Emergéticos derivados	145
5.5.4 – Expansão do novo método para o Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	147
5.5.4.1 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado	147
5.5.4.2 – Fase de construção	149
5.5.4.3 – Fase de operação	152
5.5.4.4 – Fase de desativação	153
5.5.4.5 – Produto Final	154
5.5.4.6 – Índices Emergéticos derivados	155
5.6 – COMPARAÇÕES ENTRE OS CICLOS	157
5.6.1 – Proporção entre fluido de trabalho e componentes do ciclo	158
5.6.2 – Proporção entre índices emergéticos básicos	160
5.7 – COMPARAÇÃO COM OUTROS SISTEMAS	161
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E EXTENSÕES	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
ANEXO A	170

ANEXO B	171
ANEXO C	172
ANEXO D	173
ANEXO E	174
ANEXO F	175
ANEXO G	176
ANEXO H	177
ANEXO I	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Modelo de um ciclo de Rankine básico. (b) Diagrama T-s para um ciclo de Rankine básico. Fonte: Shapiro e Moran (2018).	2
Figura 1.2 – Exemplo de uma janela ambiental para uma planta de geração de energia elétrica com fonte térmica. Fonte: Brown, Raugi e Ulgiati (2012).	8
Figura 3.1 – (a) Modelo de um ciclo ORC reversível. (b) Diagrama T-s para um ciclo ORC reversível.	26
Figura 3.2 – Diagrama T-s para um ciclo ORC irreversível.	30
Figura 3.3 – (a) Modelo de um ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado. (b) Diagrama T-s para um ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado.	34
Figura 3.4 – Diagrama T-s para um ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado.	39
Figura 3.5 – Janela ambiental para um ciclo ORC genérico.	45
Figura 4.1 – Fluxograma contendo o procedimento para obtenção dos resultados emergéticos para um ciclo termodinâmico.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Índices emergéticos básicos.	46
Tabela 3.2 – Índices emergéticos derivados.	47
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados de acordo com Zhang <i>et al.</i> (2018).	49
Tabela 4.2 – Propriedades termodinâmicas obtidas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang <i>et al.</i> (2018).	51
Tabela 4.3 – Área, massa e taxa de energia obtidas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à de Zhang <i>et al.</i> (2018).	53
Tabela 4.4 – Taxa de energia obtida para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à de Zhang <i>et al.</i> (2018).	53
Tabela 4.5 – Diferença percentual entre área, massa e taxa de energia obtida para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang <i>et al.</i> (2018) devido a mudança de entalpia no ponto (2) da Fig. (3.1.a).	54
Tabela 4.6 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	56
Tabela 4.7 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	57
Tabela 4.8 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente a fase de operação para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	58
Tabela 4.9 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente a fase de desativação para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	59
Tabela 4.10 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente ao produto do ciclo para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	61
Tabela 4.11 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	63
Tabela 4.12 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível para validação do método de Zhang <i>et al.</i> (2018).	61
Tabela 4.13 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang <i>et al.</i> (2018).	62
Tabela 4.14 – Diferença percentual entre os índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang <i>et al.</i> (2018).	64
Tabela 5.1 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.	66

Tabela 5.2 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 .	67
Tabela 5.3 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.	68
Tabela 5.4 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .	68
Tabela 5.5 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	70
Tabela 5.6 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	71
Tabela 5.7 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	73
Tabela 5.8 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	73
Tabela 5.9 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.	74
Tabela 5.10 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 .	75
Tabela 5.11 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.	75
Tabela 5.12 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .	76
Tabela 5.13 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	76
Tabela 5.14 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	77
Tabela 5.15 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	78
Tabela 5.16 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	78
Tabela 5.17 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível com fluido R134a referente a fase de construção.	80

Tabela 5.18 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível com fluído NH_3 referente a fase de construção.	81
Tabela 5.19 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção.	82
Tabela 5.20 – Índices emergéticos do NH_3 para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção.	82
Tabela 5.21 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído R134a referente a fase de operação.	84
Tabela 5.22 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído NH_3 referente a fase de operação.	84
Tabela 5.23 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído R134a referente a fase de operação.	85
Tabela 5.24 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído NH_3 referente a fase de operação.	85
Tabela 5.25 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído R134a referente ao produto do ciclo.	87
Tabela 5.26 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluído NH_3 referente ao produto do ciclo.	87
Tabela 5.27 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível com o fluido R134a.	88
Tabela 5.28 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível com o fluido NH_3 .	88
Tabela 5.29 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.	89
Tabela 5.30 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 .	90
Tabela 5.31 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de construção.	91
Tabela 5.32 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluído NH_3 referente a fase de construção.	92
Tabela 5.33 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção.	93

Tabela 5.34 – Índices emergéticos do NH_3 para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção.	93
Tabela 5.35 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação.	94
Tabela 5.36 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH_3 referente a fase de operação.	94
Tabela 5.37 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação.	95
Tabela 5.38 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH_3 referente a fase de operação.	95
Tabela 5.39 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente ao produto do ciclo.	95
Tabela 5.40 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH_3 referente ao produto do ciclo.	96
Tabela 5.41 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a.	96
Tabela 5.42 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH_3 .	96
Tabela 5.43 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.	97
Tabela 5.44 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .	97
Tabela 5.45 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de construção.	98
Tabela 5.46 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH_3 referente a fase de construção.	99
Tabela 5.47 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.	100

Tabela 5.48 – Índices emergéticos do NH_3 para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.	100
Tabela 5.49 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente a fase de operação.	101
Tabela 5.50 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente a fase de operação.	101
Tabela 5.51 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente a fase de operação.	102
Tabela 5.52 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente a fase de operação.	102
Tabela 5.53 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente ao produto do ciclo.	103
Tabela 5.54 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente ao produto do ciclo.	103
Tabela 5.55 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	103
Tabela 5.56 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	104
Tabela 5.57 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	104
Tabela 5.58 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	104

Tabela 5.59 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de construção.	106
Tabela 5.60 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH ₃ referente a fase de construção.	107
Tabela 5.61 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.	108
Tabela 5.62 – Índices emergéticos do NH ₃ para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.	108
Tabela 5.63 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.	109
Tabela 5.64 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH ₃ referente a fase de operação.	109
Tabela 5.65 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.	110
Tabela 5.66 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH ₃ referente a fase de operação.	110
Tabela 5.67 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente ao produto do ciclo.	111
Tabela 5.68 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH ₃ referente ao produto do ciclo.	111
Tabela 5.69 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a.	111

Tabela 5.70 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	112
Tabela 5.71 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.	112
Tabela 5.72 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .	112
Tabela 5.73 – Comparação dos dados termodinâmicos e emergéticos para os diferentes ciclos ORC e seus respectivos fluidos de trabalho.	113
Tabela 5.74 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.	117
Tabela 5.75 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 1.	117
Tabela 5.76 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.	118
Tabela 5.77 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 1.	118
Tabela 5.78 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.	119
Tabela 5.79 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.	120
Tabela 5.80 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.	121
Tabela 5.81 – Índices emergéticos do NH_3 para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.	121
Tabela 5.82 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.	122
Tabela 5.83 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.	122
Tabela 5.84 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.	123
Tabela 5.85 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.	123

Tabela 5.86 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 1.	123
Tabela 5.87 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 1.	124
Tabela 5.88 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a utilizando a Consideração 1.	124
Tabela 5.89 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH ₃ utilizando a Consideração 1.	124
Tabela 5.90 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.	125
Tabela 5.91 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ utilizando a Consideração 1.	125
Tabela 5.92 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 2.	128
Tabela 5.93 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ utilizando a Consideração 2.	128
Tabela 5.94 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.	129
Tabela 5.95 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.	130
Tabela 5.96 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.	131
Tabela 5.97 – Índices emergéticos do NH ₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.	131
Tabela 5.98 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.	132
Tabela 5.99 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.	132
Tabela 5.100 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.	133
Tabela 5.101 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH ₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.	133

Tabela 5.102 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2.	133
Tabela 5.103 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2.	134
Tabela 5.104 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluído R134a utilizando a Consideração 2.	134
Tabela 5.105 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluído NH ₃ utilizando a Consideração 2.	134
Tabela 5.106 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a utilizando a Consideração 2.	135
Tabela 5.107 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ utilizando a Consideração 2.	135
Tabela 5.108 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a utilizando a Consideração 2 e 3.	139
Tabela 5.109 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ utilizando a Consideração 2 e 3.	139
Tabela 5.110 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.	140
Tabela 5.111 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.	141
Tabela 5.112 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.	142
Tabela 5.113 – Índices emergéticos do NH ₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.	142
Tabela 5.114 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.	143
Tabela 5.115 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.	143
Tabela 5.116 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.	144
Tabela 5.117 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.	144

Tabela 5.118 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2 e 3.	144
Tabela 5.119 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2 e 3.	145
Tabela 5.120 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluído R134a utilizando a Consideração 2 e 3.	145
Tabela 5.121 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluído NH ₃ utilizando a Consideração 2 e 3.	145
Tabela 5.122 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a utilizando a Consideração 2 e 3.	146
Tabela 5.123 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluído NH ₃ utilizando a Consideração 2 e 3.	146
Tabela 5.124 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado e fluído R134a utilizando o novo método.	148
Tabela 5.125 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado e fluído NH ₃ utilizando o novo método.	148
Tabela 5.126 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluído R134a referente a fase de construção utilizando o novo método.	150
Tabela 5.127 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluído NH ₃ referente a fase de construção utilizando o novo método.	151
Tabela 5.128 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção utilizando o novo método.	152
Tabela 5.129 – Índices emergéticos do NH ₃ para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção utilizando o novo método.	152

Tabela 5.130 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o R134a referente a fase de operação utilizando o novo método.	153
Tabela 5.131 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o NH ₃ referente a fase de operação utilizando o novo método.	153
Tabela 5.132 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido R134a referente a fase de operação utilizando o novo método.	154
Tabela 5.133 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH ₃ referente a fase de operação utilizando o novo método.	154
Tabela 5.134 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o R134a referente ao produto do ciclo utilizando o novo método.	155
Tabela 5.135 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o NH ₃ referente ao produto do ciclo utilizando o novo método.	155
Tabela 5.136 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido R134a utilizando o novo método.	155
Tabela 5.137 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH ₃ utilizando o novo método.	156
Tabela 5.138 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido R134a utilizando o novo método.	156
Tabela 5.139 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH ₃ utilizando o novo método.	156
Tabela 5.140 – Comparação dos dados termodinâmicos e emergéticos para os diferentes ciclos ORC e seus respectivos fluidos de trabalho com o novo método para os ciclos irreversíveis.	158

Tabela 5.141 – Comparação entre a massa do fluído de trabalho com a massa dos componentes dos ciclos ORC.	159
Tabela 5.142 – Comparação entre a energia do fluído de trabalho com a energia dos componentes de aço dos ciclos ORC.	160
Tabela 5.143 – Comparação entre os índices energéticos básicos dos ciclos ORC.	161
Tabela 5.144 – Comparação dos índices energéticos derivados para os diferentes ciclos ORC e outros seis sistemas de geração de potência, conforme Zhang <i>et al.</i> (2018).	162

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{eva/con/af}$	Área dos trocadores de calor [m ²]
C_r	Calor residual [J]
C_{diesel}	Média do consumo de Diesel [MJ/(kt.km)]
d	Distância percorrida na fase de desativação [km]
D_{trans}	Diesel para transporte [J]
E_{ciclo}	Energia produzida ao longo do ciclo de vida do sistema [J]
$E_{l/con}$	Energia liberada pelo condensador [J]
E_{vc}	Energia do volume de controle [J]
EIS	Índice emergético de sustentabilidade [adimensional]
EIR	Taxa de investimento ambiental [adimensional]
ELR	Taxa de carregamento ambiental [adimensional]
EYR	Taxa de rendimento energético [adimensional]
F_n	Insumos adquiridos não renováveis [J]
F_r	Insumos adquiridos renováveis [J]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² .K)]
h_i	Entalpia [kJ/kg]
k	Condutividade térmica [W/(m.K)]
L_{ft}	Perda de fluído de trabalho no ciclo [%]
$\dot{m}$	Vazão mássica total do ciclo [kg/s]
$\dot{m}_3$	Vazão mássica proveniente do segundo estágio da turbina [kg/s]
$\dot{m}_{cr}$	Vazão mássica do gás de calor residual [kg/s]
$\dot{m}_{ar,f}$	Vazão mássica da ar no condensador [kg/s]
$\dot{m}_{ar,q}$	Vazão mássica de ar no evaporador [kg/s]
$\dot{m}_{água,f}$	Vazão mássica da água no condensador [kg/s]
$\dot{m}_{água,q}$	Vazão mássica da água no evaporador [kg/s]
$m_{eva/con/af}$	Massa dos trocadores de calor [kg]

m_{ft}	Massa fluído de trabalho [kg]
m_{tcclo}	Massa total do ciclo [kg]
n	Tempo de operação anual do sistema [horas]
N	Recursos ambientais não renováveis [J]
P	Produto [J]
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor [W]
$\dot{Q}_{af}$	Taxa de transferência de calor do aquecedor de alimentação fechado [W]
$\dot{Q}_{cond}$	Taxa de transferência de calor do condensador [W]
$\dot{Q}_{eva}$	Taxa de transferência de calor do evaporador [W]
$\dot{Q}_{vc}$	Taxa de transferência de calor do volume de controle [W]
R	Recursos ambientais renováveis [J]
T_r	Transformada [sej/J]
ΔT_{con}	Diferença de temperatura do condensador [°C]
ΔT_{eva}	Diferença de temperatura do evaporador
$\Delta T_{m_{eva/con/af}}$	Média logarítmica das diferenças de temperatura dos trocadores de calor [°C]
T_{cr}	Temperatura do gás de calor residual [°C]
U	Energia potencial [J]
$U_{eva/con/af}$	Coeficiente global de transferência de calor [W/(m².K)]
v	Velocidade [m/s]
$\dot{W}$	Trabalho [W]
$\dot{W}_b$	Trabalho da bomba [W]
$W_{líquido}$	Trabalho líquido do sistema [W]
$\dot{W}_t$	Trabalho da turbina [W]
$\dot{W}_{t1}$	Trabalho da turbina de primeiro estágio [W]
$\dot{W}_{t2}$	Trabalho da turbina de segundo estágio [W]
$\dot{W}_{vc}$	Trabalho do volume de controle [W]
y	Tempo de operação do sistema [anos]

Y	Rendimento [sej]
z	Altitude [m]

LETRAS GREGAS

α_b	Massa requerida pela bomba [kg/kW]
α_t	Massa requerida pela turbina [kg/kW]
β	Massa de fluido de trabalho requerida pela turbina [kg/kW]
ε	Efetividade [adimensional]
$\delta_{eva/con/af}$	Espessura das placas dos trocadores de calor [m]
η	Eficiência térmica [adimensional]
$\rho_{eva/con/af}$	Densidade dos trocadores de calor [kg/m ³]
$\rho_{aço}$	Densidade do aço [kg/m ³]
η_t	Eficiência isentrópica da turbina [adimensional]
η_b	Eficiência isentrópica da bomba [adimensional]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – MUDANÇAS NO CLIMA AO LONGO DO TEMPO

Desde a segunda revolução industrial, quando a expansão da indústria começou a tomar proporções mundiais, os recursos naturais passaram a ser explorados de forma mais intensiva alterando de forma agressiva o meio ambiente que nos circunda. Inicialmente com a invenção da máquina a vapor, o desmatamento para obtenção de carvão vegetal e a exploração para adquirir carvão mineral passaram a ocorrer de forma mais acelerada causando poluição atmosférica provinda da sua queima, liberando gases como dióxido carbônico (CO_2) o qual é um dos gases causadores do efeito estufa, emitindo particulados entre outros.

Somado a isso outras áreas da indústria evoluíram neste mesmo período. De acordo com Mokyr (1998), nesta época ocorreram os desenvolvimentos nas áreas de energia, materiais, produtos químicos e medicina. Até então, não existia uma economia de fabricação e exportação global assim como o conhecimento técnico e científico para tal. Cada uma dessas áreas de desenvolvimento estava interligada, sendo uma responsável por gerar, providenciar ou levar insumos para a outra. Com esta necessidade excessiva de insumos e a descoberta de novos materiais como o aço, foi possível desenvolver motores a combustão e posteriormente os ciclos de geração de potência. Todas essas novas descobertas e métodos industriais trouxeram também outros tipos de poluição, seja na geração de resíduos ou rejeitos, no desmatamento para exploração mineral ou vegetal, para construção de instalações dentre outros.

Até o início dos anos 1930 uma mudança na temperatura do planeta havia sido notada através de algumas alterações como, por exemplo, o não congelamento de rios, redução das geleiras, mudança do local de migração de animais entre outros. Contudo os cientistas da época pensaram que se tratava apenas de mais um período de aquecimento do planeta. Entretanto foi a partir dos anos 60, conforme descrito por

Weart (1997), que os pesquisadores começaram a se preocupar com questões ambientais no momento em que constatarem um rápido aumento da temperatura e alterações na órbita do planeta, níveis mais altos de radiação solar, modificações espontâneas das correntes marítimas, maiores níveis de concentração de dióxido de carbono dentre outras mudanças climáticas que o planeta vinha sofrendo.

A partir destas constatações, esforços para tentar conter os impactos ambientais causados pela intervenção humana se iniciaram como a busca pela utilização de matérias primas provinda de fontes renováveis ou que impactassem menos o ambiente, utilização de processos menos nocivos ao meio ambiente e fontes de geração de energia mais renováveis. Com isto, possuir a informação de que um material/método seja mais sustentável e impacte menos o meio ambiente em relação a outro passou a ser utilizado nas tomadas de decisões para escolha de determinado produto ou serviço.

Este estudo tem como objetivo mensurar a sustentabilidade do processo de geração de potência através de ciclos orgânicos de Rankine (ORC), a fim de verificar quais ciclos são mais ou menos sustentáveis em termos de análise emergética.

1.2 – O CICLO ORGÂNICO DE RANKINE

O ciclo orgânico de Rankine consiste em um tipo de sistema de geração de potência a vapor que utiliza um ciclo termodinâmico para disponibilizar energia elétrica e/ou mecânica. Este tipo de ciclo funciona a partir da utilização de um fluido de trabalho com mudança de fase. Um esquema do ciclo básico de Rankine pode ser visualizado na Fig. 1.1.

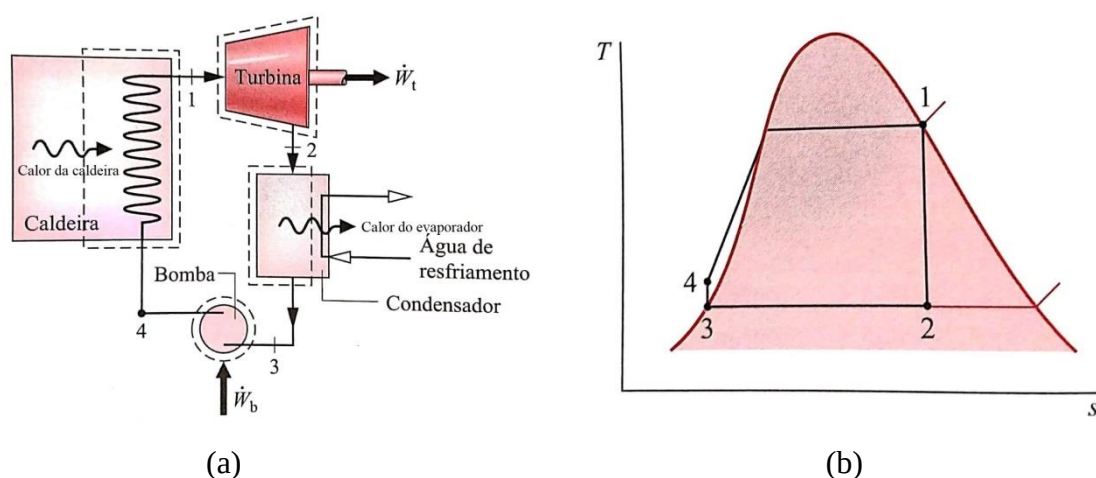


Figura 1.1 – (a) Modelo de um ciclo de Rankine básico. (b) Diagrama T-s para um ciclo de Rankine básico. Fonte: Shapiro e Moran (2018).

O fluido é aquecido por uma fonte geradora de calor até o seu estado de vapor, seguindo para uma turbina onde ocorre a expansão responsável por gerar energia mecânica/ elétrica. O fluido é então resfriado no condensador ao circular próximo ao fluxo de um fluido frio e então bombeado de volta para o aquecimento. O aquecimento pode provir de diversas fontes como, a queima de combustíveis fósseis, reação nuclear, fontes geotérmicas ou aquecedores solares. Os sistemas reais utilizados na indústria (irreversíveis) normalmente agregam outros componentes com o intuito de aumentar a eficiência térmica e/ou a potência do ciclo a fim de se produzir mais energia mecânica/elétrica, como por exemplo, turbinas adicionais, aquecedores após o condensador, dentre outros.

Os ciclos ideais de geração de potência a vapor reversíveis se diferem dos ciclos reais irreversíveis pelo fato de não serem consideradas as perdas devido às irreversibilidades intrínsecas aos sistemas. Alguns tipos de irreversibilidade que ocorrem são: irreversibilidade interna nas turbinas e bombas/compressores, causando queda e aumento de entropia reduzindo a potência líquida do sistema; atrito do fluido de trabalho; perda de calor para o meio externo e assim por diante. Neste trabalho serão abordados ciclos reversíveis e irreversíveis a fim de verificar o impacto da irreversibilidade nos resultados de cada tipo de sistema.

Desde o final do século passado estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de obter substitutos para os fluidos CFC's e com isso, os fluidos orgânicos vêm ganhando espaço, principalmente em aplicações com calor residual provindos de atividades industriais para geração de energia elétrica através do ciclo orgânico de Rankine "*Organic Rankine Cycle – ORC*" onde as temperaturas oscilam entre 90°C e 350°C. O ciclo ORC apresenta componentes semelhantes aos do ciclo de Rankine comum, havendo apenas a diferença do fluido de trabalho e as temperaturas de operação do ciclo termodinâmico. Sendo assim, é preciso estudar os diferentes tipos de fluidos orgânicos a fim de escolher o fluido com as melhores propriedades para determinada aplicação em um ciclo.

Um ciclo ORC empregado para produzir eletricidade a partir de calor residual será o alvo deste estudo, avaliando o ciclo para diferentes fluidos orgânicos de trabalho e diferentes configurações de montagem do ciclo (alterando e adicionando componentes) com o intuito de obter uma base de cálculos termodinâmicos realizando assim, uma expansão para análise emergética e então comparar os resultados para os diferentes ciclos e diferentes fluidos de trabalho.

1.3 – TIPOS DE ANÁLISES DE CICLOS TERMODINÂMICOS

Existem diversas ferramentas para análises de ciclos termodinâmicos, sendo algumas delas a energética, exérgica, minimização da geração de entropia, entransia, termoeconômica, exergoeconômica e emergia. Esses diferentes tipos de análise de ciclos termodinâmicos serão apresentados brevemente a seguir.

A análise energética corresponde ao método mais usual para mensurar ciclos termodinâmicos. A partir da definição das hipóteses simplificadoras que regem o sistema, um volume de controle deve ser selecionado contendo o componente do ciclo que se deseja analisar para então aplicar um balanço de energia através da primeira lei da termodinâmica e obter assim, a quantidade de calor ou trabalho de um determinado componente ou do ciclo como um todo. Neste tipo de análise os índices que são comumente usados para classificar ou comparar diferentes ciclos termodinâmicos são: potência líquida, diferença entre a potência gerada pela(s) turbina(s), a potência consumida pela(s) bomba(s) e o rendimento do ciclo dado em termos percentuais pela relação entre a potência líquida do ciclo e a taxa de energia fornecida ciclo.

Exergia, de acordo com Shapiro e Moran (2018), corresponde ao maior trabalho que pode ser gerado durante o processo de equilíbrio entre o sistema e o ambiente, estado esse de equilíbrio conhecido como estado morto. O índice de exergia nunca pode ser negativo e varia conforme as condições do meio ambiente. A eficiência exérgica soma-se a análise energética pois, a primeira lei da termodinâmica fornece a quantidade de potência produzida pelo ciclo enquanto a análise exérgica mensura através da segunda lei da termodinâmica a taxa de aproveitamento exérgico, ou seja, mede a eficácia da utilização da energia disponível no sistema. O índice que mede a eficiência exérgica provém do balanço entre as taxas de energia e exergia, tendo uma formulação diferente para cada componente do ciclo termodinâmico.

Entropia está relacionada com o grau agitação das partículas de um sistema, ou seja, conforme um sistema recebe calor o grau de agitação de suas partículas tende a aumentar então sua entropia aumenta. Quando um sistema perde calor suas partículas tendem a agitar menos e consequentemente a entropia diminuiu, e quando um sistema permanece em equilíbrio térmico a entropia tende a zero. A entropia trata-se de uma propriedade não conservativa, ou seja, ela é produzida nos sistemas a partir de irreversibilidade conforme descrito por Shapiro e Moran (2018), sendo assim a entropia sempre tem que ser maior ou igual a zero, nunca negativa. Desse modo temos que a

geração de entropia mede o trabalho que deixa de ser aproveitado pelo sistema devido às irreversibilidades, e com isso vem o termo de minimização da geração de entropia de um ciclo termodinâmico, que corresponde a busca pela máxima otimização da utilização do trabalho disponível pelo sistema. O índice de minimização da geração de entropia é dado pela diferença entre a taxa real de trabalho pela taxa ideal (sem irreversibilidade).

Outro tipo de análise de ciclos termodinâmicos que vem sendo utilizado recentemente é a análise de entransia. Apresentado primeiramente em 2007 por Guo, Liang e Xin (2007) com o intuito de medir irreversibilidades de certas trocas de calor nas quais a entropia não era capaz de mensurar de forma satisfatória, partindo da quantificação do calor reversível do sistema, ou seja, a entransia mede a energia potencial do sistema que pode ser transferida em forma de calor. De acordo com Del Rio Oliveira e Milanez (2014) a transferência de entransia é proporcional a transferência de exergia a partir de uma temperatura fixada para o meio externo, sendo que a entransia diminuiu a medida que a transferência de calor ocorre entre o sistema e o meio externo, podendo então ser relacionada com a taxa de geração de entropia ou destruição de exergia. Desse modo a análise de entransia mensura a capacidade do sistema em transformar a energia disponível em calor para ser aproveitado pelo próprio sistema, equivalente ao se aplicar a taxa mínima de geração de entropia.

A análise exergoeconômica também contribuiu para a verificação de ciclos termodinâmicos. Tsatsaronis e Winhold (1985) apresentam em sua pesquisa uma definição para este tipo de análise como sendo uma combinação entre o estudo exergético e econômico para avaliar os processos de conversão de energia. O foco deste tipo de abordagem é avaliar os custos atrelados às irreversibilidades do ciclo termodinâmico e posterior comparação com o investimento de cada componente do ciclo separadamente, para então aperfeiçoar o sistema tanto em termos energéticos quanto econômicos.

No mesmo segmento da análise exergoeconômica, a análise termoeconômica também relaciona a exergia e energia, entretanto sua abordagem é mais geral, relacionando a análise termodinâmica provinda da primeira lei com a aplicação de uma análise econômica geral para o sistema e não para cada componente como é realizada na análise exergoeconômica, conforme apresentado também por Tsatsaronis e Winhold (1985).

A análise emergética se apresenta como outra ferramenta adicional para análises de ciclos termodinâmicos, da mesma maneira que os outros tipos de análises

apresentados nesta seção, ela será utilizada neste estudo como medida adicional para verificar a viabilidade da utilização de certos ciclos orgânicos de Rankine e será detalhada na seção a seguir.

1.4 – ANÁLISES DE CICLO DE VIDA E EMERGIA

O termo “energia” já está amplamente difundido em virtude dos diversos estudos realizados inicialmente pelos físicos do século XVIII até os primeiros trabalhos voltados para a área térmica, principalmente a partir das publicações de James Prescott Joule ocorridos no século XIX, que culminaram no desenvolvimento da primeira lei da termodinâmica. A energia é medida em termos de caloria, onde uma caloria corresponde ao calor necessário para aquecer 1°C um grama de água, de modo que uma quilocaloria corresponde a 4.186 Joules.

Em contra partida, a emergia mede não apenas a energia disponível como também toda energia utilizada para chegar ao estado final de um sistema. Odum (1996) elucida a emergia como uma “memória energética” e exemplifica a energia e a emergia da seguinte maneira: Considerando uma floresta, ao queimar as árvores, a energia estará sendo liberada na forma de calor. Já em termos energéticos para a mesma floresta, emergia corresponde a toda energia absorvida pela floresta (sol, água, oxigênio, nutrientes, dentre outros) assim como a energia disponível na floresta no estado atual que pode ser convertida em calor no caso da queima, por exemplo. Este tipo de análise inicialmente foi utilizado muito por biólogos com o intuito de medir a emergia de ecossistemas e nos últimos anos vem sendo adotada nos estudos de engenharia para avaliar o impacto ambiental na produção de algum material ou intervenção ambiental para instalação e utilização de recursos, devido a isto, existem dificuldades em encontrar dados energéticos para determinados materiais ou processos para uma análise aplicada à engenharia, no caso deste estudo, produção de energia elétrica através de um ciclo orgânico de Rankine (ORC) utilizando calor residual como fonte térmica para aquecimento do fluído.

De maneira mais técnica, Odum (1996) define a emergia como sendo: “Energia disponível utilizada direta ou indiretamente para produzir um produto ou serviço, ou seja, é a contribuição em termos de energia e é medida em [emjoule]”.

Uma forma alternativa de se medir a emergia é a emergia em termos solar, nomeada de emergia solar (*Solar Emergy*). Odum (1996) a define como: “Energia em

termo solar disponível utilizada direta ou indiretamente para produzir um produto ou serviço, ou seja, é a contribuição em termos de energia e é medida em solar emjoule [sej]”. A diferença entre este tipo de energia e a outra apresentada no parágrafo anterior é a base de comparação para a energia onde, neste caso, a base de comparação é a energia emitida pela radiação solar. Os estudos de análise emergética usualmente usam a energia solar, pois em termos de hierarquia de energia no nosso planeta a energia solar é o primórdio para a geração dos recursos ou insumos básicos e sua emissão é constante, sendo um ótimo parâmetro para comparação. Devido a isto, este estudo seguirá esta tendência e usará a energia solar em suas análises.

Para aplicar uma análise emergética é preciso realizar uma análise de ciclo de vida (*life cycle*). Em uma análise do ciclo de vida utiliza-se o conceito de janela ambiental onde, no sistema a ser estudado, aplica-se um volume de controle a fim de separar o sistema em fases e relacionar em cada uma dessas fases os insumos necessários para construção e produção de um determinado serviço ou produto. Neste estudo foi utilizado um ciclo ORC para produção de energia elétrica através do calor residual de modo que, aplicando os conceitos da janela ambiental, o sistema foi dividido nas seguintes fases:

- Fase de construção: é realizada a contabilização de todos os recursos necessários para a fabricação dos componentes do ciclo termodinâmico (trocadores de calor, turbinas, bombas, fluidos de trabalho e etc).
- Fase de operação: é realizada a contabilização dos insumos necessários para manter o sistema funcionando durante todo o seu ciclo de vida.
- Fase de desativação: é realizada a contabilização dos recursos utilizados no transporte para destinação final dos componentes do sistema como um todo.

Um exemplo de montagem de uma janela ambiental pode ser visualizado na Fig. (1.2).

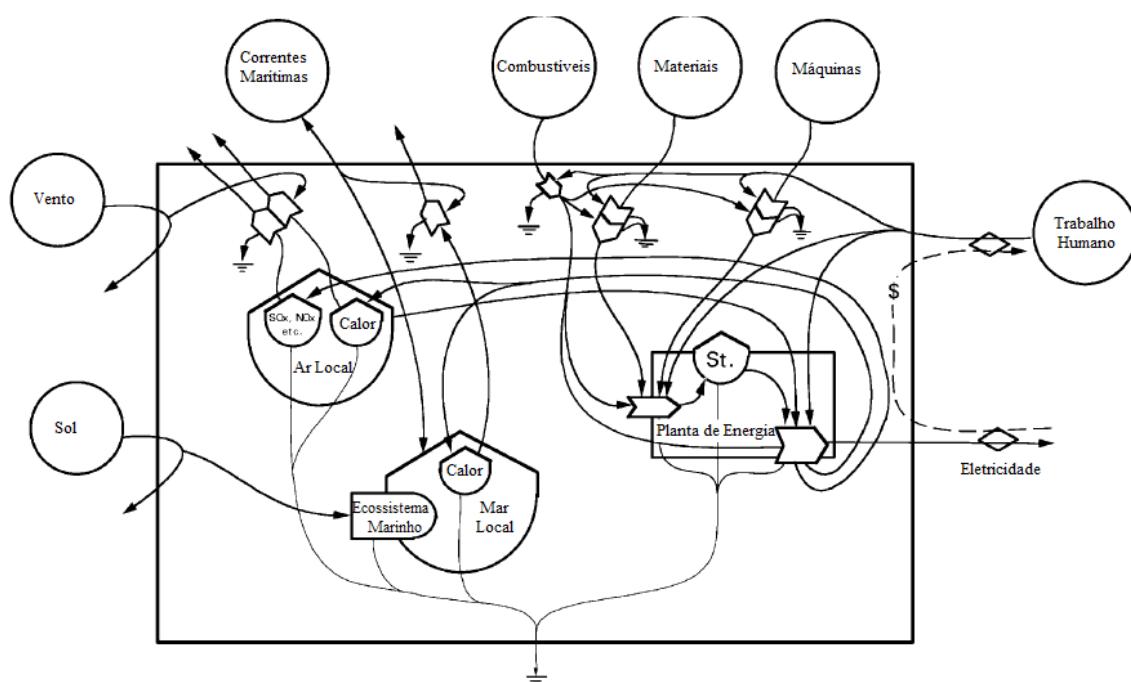


Figura 1.2 – Exemplo de uma janela ambiental para uma planta de geração de energia elétrica com fonte térmica. Fonte: Brown, Raugei e Ulgiati (2012).

Como apresentado anteriormente, dentro do volume de controle da janela ambiental é necessário inserir os recursos utilizados em cada uma das fases que a compõe, esses recursos são chamados de índices energéticos básicos e estão definidos abaixo, de acordo com Liang *et al* (2016):

- Recursos ambientais renováveis $[R]$: São recursos extraídos diretamente do meio ambiente e que são renováveis, como por exemplo, o ar, a luz solar e a água;
- Recursos ambientais não renováveis $[N]$: São recursos extraídos diretamente do meio ambiente mas não são renováveis, como por exemplo, o calor residual e alguns minérios retirados do solo;
- Insumos adquiridos renováveis $[F_r]$: São elementos que precisaram de alguma intervenção para chegar em seu estado atual mas são renováveis, como por exemplo a hidroeletricidade e a mão de obra;
- Recursos adquiridos não renováveis $[F_n]$: São elementos que precisaram de alguma intervenção para chegar em seu estado atual mas não são renováveis, como por exemplo carvão, petróleo, diesel e nitrogênio;

- Produto [P]: Representa o produto de um sistema industrial, ou seja, o resultado de um processo, como por exemplo, eletricidade em uma planta de energia, bioetanol em um sistema de produção de biocombustível, entre outros.

A partir dos índices emergéticos básicos é possível realizar os cálculos de energia para se obter os índices emergéticos derivados, dos quais partem a verificação da sustentabilidade ambiental de um serviço/produto. Esses índices são responsáveis por classificar ou explicar o comportamento do sistema em termos ambientais e emergéticos, sendo eles definidos abaixo de acordo com Liang *et al* (2016):

- Rendimento [Y]: Corresponde ao somatório dos índices emergéticos básicos (R , N , F_r , F_n) em termos de energia (suas respectivas unidades multiplicada pelas suas respectivas transformadas) e representa a quantidade total de energia necessária para se obter um determinado produto ou serviço;
- Transformada do produto [T_r]: Corresponde ao rendimento [R] dividido pelo produto [P] de modo que, mede a energia consumida pela unidade do produto. É a partir da transformada que é possível converter um termo (energia, massa ou monetário) em energia. A transformada do produto aparece de dois modos em uma análise emergética:
 - É preciso possuir a transformada dos índices emergéticos básicos (R , N , F_r , F_n) referente a cada um dos elementos utilizados na constituição de determinado material, como por exemplo: ao utilizar 1 kg de um elemento de aço na análise emergética, é preciso saber quais elementos foram utilizados na fabricação deste aço (elementos químicos, energia, calor, mão de obra utilizada entre outros) e sua proporção em termos de massa, energia ou até mesmo monetário para compor este 1kg sendo que, eles devem estar separados em termos de índices emergéticos básicos. A partir daí, é preciso multiplicar o valor destes elementos em termos de suas respectivas unidades (em massa, energia ou termos monetários) pela sua respectiva transformada a fim de obter a energia atrelada a estes elementos. Neste caso é considerado que em um determinado nível da cadeia produtiva, cada um desses elementos já foram um produto e

tiveram a sua cadeia produtiva analisada para obter esta transformada, são então valores encontrados na literatura pois não são o alvo do estudo em questão, mas já foram em algum momento no passado.

- Possuindo a emerggia de cada elemento que compõe o material de estudo, no caso do estudo hipotético do item anterior 1 kg de um elemento de aço, é preciso calcular a transformada do produto, ou seja, a transformada deste elemento de aço. Para isto é necessário somar a emerggia total de cada um dos elementos analisados no item anterior e dividir pela massa total do elemento (no caso 1kg), obtendo assim a transformada do produto.
- Taxa de rendimento emerggético [EYR]: Corresponde ao rendimento dividido pelos insumos renováveis e não renováveis. Este índice mede a capacidade do sistema em explorar recursos locais e torna-los disponíveis para investimentos em recursos externos;
- Taxa de carregamento ambiental [ELR]: Corresponde aos índices não renováveis (N e F_n) dividido pelos índices renováveis (R e F_r). Este índice mede a carga ambiental do sistema, ou seja, o impacto causado pela exploração do meio ambiente para obtê-lo, uma vez que os índices não renováveis não podem ser substituídos na natureza;
- Taxa de investimento ambiental [EIR]: Corresponde aos índices renováveis (R e F_r) dividido pelos índices não renováveis (N e F_n). Este índice mede o nível de investimento na utilização de emerggia;
- Índice emerggético de sustentabilidade [EIS]: Corresponde a divisão entre o [EYR] e o [ELR]. Este índice mede a sustentabilidade de um produto, processo ou serviço.

O índice mais utilizado na análise emerggética é o “Índice Emergético de Sustentabilidade – *EIS* (*Emergy Index of Sustainability*)”. O índice emerggético de sustentabilidade é dividido em três categorias de acordo com Liang *et al* (2016): Se $EIS < 1$, o processo é sustentável em um curto prazo; Se $1 < EIS < 5$, o processo é sustentável em um médio prazo; E se $EIS > 5$, o processo é sustentável em um longo prazo. Este tipo de análise aplicado à engenharia ainda é um termo novo, conforme

explicado por Brown e Ulgiat (2012), e ainda não há uma base de dados grande para realizar a comparação de resultados. Essa classificação de *EIS* entre intervalos de número foi e continua sendo utilizada nos estudos de biologia para mensurar a sustentabilidade de ecossistemas, economias de países e produção de determinados elementos sendo que, estes tipos de estudos possuem uma gama bem maior de resultados e comparações. Devido a isto, os primeiros estudos de engenharia utilizaram esta classificação e a utilizam até hoje, por este motivo também será utilizada neste estudo. De acordo com Brown e Ulgiat (2012) o índice emergético de sustentabilidade [*EIS*] pode ser utilizado de duas formas:

1. Para comparar diferentes sistemas ou economias em termos de sustentabilidade classificando-os em sustentável por longo, médio e curto prazo;
2. Para criar uma linha de tendência de uma determinada economia ou sistema por um determinado período sendo que, as mudanças observadas indicarão se a evolução será sustentável ou não.

A transformada [T_r] é dada na unidade [sej/unidade] e mensura a quantidade de “solarjoule” necessária para obter uma unidade do objeto desejado, por exemplo: Para produzir 25 toneladas de carvão são necessários 25 [sej], então a transformada corresponde aos 25 [sej] dividido pelas 25 toneladas de carvão sendo igual a 1[sej/t]. A partir dos dados da transformada e da unidade do objeto desejado é possível calcular a energia atrelada a esse objeto.

Neste trabalho os resultados da análise emergética serão comparados em relação a diferentes fluidos de trabalho e diferentes ORC com o intuito de se determinar o desempenho dos ciclos ORC e classifica-los em relação ao índice *EIS*.

1.4 – OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é verificar a viabilidade ambiental de diferentes ciclos ORC utilizando diferentes fluidos de trabalho através de uma análise emergética a partir dos seguintes passos:

1) Realização de análise termodinâmica para diferentes ciclos ORC, tanto reversíveis como irreversíveis, utilizando diferentes fluidos de trabalho orgânicos a título de comparação.

2) Aplicação das análises de ciclo de vida e emergética para os ciclos ORC desenvolvidos no item anterior.

3) Propor uma nova formulação para a análise de ciclos irreversíveis.

4) Comparação dos resultados para os diferentes ciclos e fluidos de trabalho, ranqueá-los em relação ao índice emergético de sustentabilidade *EIS* e verificar se são sustentáveis a longo, médio ou curto prazo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

Ao longo dos últimos anos estudos para melhorar o desempenho de ciclos orgânicos de Rankine (ORC) vêm sendo realizados a fim de se obter um melhor desempenho do ciclo, quer seja pela otimização estrutural de seus componentes, do fluido de trabalho ou até mesmo das condições de operação como temperatura e pressão, uma vez que este tipo de sistema de geração de potência já está bastante difundido tanto em aplicações teóricas como práticas.

Com este intuito Li, Wang e Du (2012) estudaram a influência do pinch point e da temperatura de evaporação (PPTD) no desempenho de um ciclo básico ORC contendo apenas um evaporador, um condensador, uma turbina e uma bomba com fonte de calor residual provindo de gases de combustão. Os autores avaliaram tanto o evaporador como o condensador utilizando fluidos orgânicos secos e isentrópicos. Foi determinado que nem todos os fluidos orgânicos de trabalho conseguem atingir a potência útil máxima do sistema e que, com o aumento do (PPTD), o comportamento entre a área total de transferência de calor e o desempenho econômico (potência líquida dividida pela área total de transferência de calor) são inversamente proporcionais, ou seja, com o aumento do (PPTD) a área total de transferência de calor diminui inicialmente e depois aumenta enquanto o desempenho econômico diminui. Foi observado também que os fluidos orgânicos isentrópicos apresentam desempenho econômico superior aos fluidos orgânicos secos. Com os resultados obtidos os autores verificaram que o ciclo com fluido de trabalho R11 obteve a maior potência líquida por área de transferência de calor e posterior a ele o R123, R245fa e R114, nesta ordem.

Bufl, Camporeale e Cinnella (2017) apresentaram uma análise para a viabilização da utilização de gases de escape como fonte térmica residual para um ciclo ORC, fazendo uma relação entre o fluxo e a massa dos gases de escape com a temperatura de trabalho do ciclo. Os autores buscaram por uma combinação de parâmetros do ciclo que maximizasse a eficiência do ciclo ao mesmo tempo em que

minimizasse demais variações, ao qual eles chamaram de otimização robusta, utilizando seis diferentes fluidos orgânicos. Considerando um ciclo reversível, obtiveram como parâmetros mais influentes o resultado de eficiência térmica e de exergia do ciclo e as temperaturas do evaporador e condensador. Dos fluidos estudados, o R11 e o R113 resultaram em ciclos ORC mais eficientes.

A utilização de diferentes fluidos orgânicos também está relacionada com o desempenho do ciclo ORC, como pode ser visto no estudo de Liu *et al.* (2014), onde foi abordada a eficiência do ciclo ORC por meio da eficiência da transferência de calor e a eficiência termodinâmica para o ciclo, com fonte de calor geotérmica operando através de temperaturas entre 120°C e 150°C com a função de gerar energia elétrica. Nesta pesquisa os autores utilizaram oito fluidos orgânicos de trabalho diferentes classificados como HFOs (hidrofluoroolfinas), que possuem como característica um baixo potencial de aquecimento global (GWP) e classificação zero para potencial de degradação de ozônio (ODP). Os autores sugeriram um novo termo, temperatura ideal da fonte de calor, para ser analisado juntamente com o pinch point para determinar a eficiência do ciclo, eles também compararam os resultados obtidos com os fluidos orgânicos mais utilizados sendo eles o R134a, R245fa e isopentano. Com este estudo os autores verificaram que a eficiência do sistema aumenta significativamente com o aumento da temperatura de salmoura geotérmica onde, os fluidos com maior temperatura crítica necessitam de maiores temperaturas de salmoura geotérmica para que haja a transição do pinch point do evaporador para o pré-aquecedor e também que, a eficiência do sistema aumenta com o aumento da pressão operacional. Em relação aos fluidos HFOs testados, o R1234yf foi considerado adequado por obter uma temperatura de operação em 120°C e por não possuir o pinch point como fator limitante, já o fluido R1225yeE obteve eficiência térmica de 8,7% mostrando assim ser uma boa opção também como escolha para o ciclo ORC com temperaturas em torno de 150°C somado a isso o fato de sua eficiência não ser limitado pelo aumento da pressão operacional. A maior temperatura obtida foi de 150°C e o fluido HFOs com maior eficiência térmica foi o R1234zeZ com o valor de 8,9%, valor este mais próximo ao melhor resultado de um fluido orgânico usual, o R245fa com 9,27%, mostrando que os HFOs podem ser utilizados como substitutos principalmente ao considerar os efeitos ambientais.

Partindo do mesmo seguimento de análise conforme o último estudo apresentado, Uusitalo *et al.* (2018) também investigaram o comportamento de diferentes fluidos orgânicos a partir de suas propriedades termodinâmicas, com o intuito de

selecionar o fluido ideal para determinada temperatura de operação aplicada a um ciclo orgânico de Rankine. Os grupos de fluidos utilizados pelos autores foram hidrocarbonetos, fluorocarbonetos e siloxanos, totalizando trinta e cinco diferentes fluidos que foram relacionados segundo suas temperaturas críticas e massa molar. Foi observado neste estudo que se for possível utilizar uma pressão abaixo da pressão crítica do fluido, quanto maior a temperatura crítica do fluido de trabalho maior será a eficiência do ciclo ORC. Observou-se também que temperaturas críticas mais altas acarretam em altas taxas de expansão e baixas pressões no condensador, esta alta taxa de expansão foi mais observada nos fluidos siloxanos e hidrocarbonetos com características de temperaturas críticas mais altas, sendo então considerados ideais os hidrocarbonetos com baixa temperatura crítica para aplicações com ciclos de baixa temperatura enquanto os siloxanos e hidrocarbonetos de alta temperatura apresentaram melhor desempenho nos ciclos ORC de mais altas temperaturas. Foi constatado que as pressões de evaporação e condensação, a eficiência do ciclo e a vazão mássica estão relacionadas com os grupos dos fluidos de trabalho e com a temperatura crítica de cada fluido, sendo então ideal comparar fluidos do mesmo grupo para otimizar a eficiência do sistema e recomendado optar por fluidos que possuam temperatura crítica próximo da temperatura da fonte de calor do sistema para assim, atingir uma alta eficiência do ciclo e uma pressão no evaporador viável ao processo.

Para auxiliar na escolha de um fluido orgânico para aplicações termodinâmicas, Chen, Goswami e Stefanakos (2010) realizaram uma revisão para ciclos ORC e ciclos ORC supercríticos com fonte de calor residual para geração de energia elétrica utilizando trinta e cinco diferentes fluidos de trabalho. Os autores denotaram em sua pesquisa a importância das propriedades físicas, estabilidade, impacto ambiental e custos para escolha do fluido ideal, também verificaram como o calor latente, densidade e calor específico alteram as condições de superaquecimento. Após analisar todos os diferentes fluidos de trabalho para os dois tipos de ciclos ORC apresentados, foi percebido que os ciclos ORC tem menor eficiência térmica comparados com os ciclos supercríticos, entretanto o ciclo supercrítico necessita de maiores pressões operacionais. Fluidos com alta densidade e alto calor latente apresentaram maior trabalho realizado pela turbina. Os fluidos isentrópicos e secos apresentaram melhores resultados aplicados ao ciclo ORC com superaquecimento enquanto os fluidos úmidos se destacaram em aplicações no ciclo ORC comum, em vista que o superaquecimento se mostrou

prejudicial na eficiência dos fluidos úmidos. Outra característica do ciclo supercrítico foi o melhor desempenho de fluidos com menores temperaturas e pressões críticas.

No mesmo caminho, Saleh *et al.* (2007) exploraram trinta e um diferentes fluidos orgânicos de trabalho, sendo eles dos tipos alcanos, alcanos fluorados, éteres e éteres fluorados aplicados a um ciclo ORC com temperaturas variando entre 30 e 100°C provindos de fontes geotérmicas, limitados em sua maioria operando a 20 bar de pressão. Os autores utilizaram a eficiência térmica como parâmetro para comparação entre os diferentes fluidos de trabalho. Utilizando essa proposta, os autores validaram que as maiores eficiências térmicas são obtidas com as substâncias que possuem os maiores pontos de ebulição com a linha de vapor saturado tendendo ao processo subcrítico e também que, a transferência de calor se dá a uma taxa maior para os fluidos supercríticos e menor para os subcríticos com alta temperatura de ebulição.

Eyerer *et al.* (2016) verificaram a viabilidade da substituição do fluido orgânico R245fa para o fluido orgânico R1233zd-E, devido à característica ambiental do R1233zd-E de baixo GWP (índice que mede o potencial de aquecimento global de uma substância), para aplicação em um ciclo orgânico de Rankine a partir da comparação de parâmetros termodinâmicos como eficiência e potência do ciclo ORC. Ambos os fluidos foram submetidos a testes para verificar a influência da vazão mássica, temperatura de condensação e velocidade de rotação do expensor (turbina) utilizando como fonte de calor para o ciclo um aquecedor elétrico. Com o experimento, foi observado que o R1233zd-E pode ser considerado um bom substituto para o R245fa não apenas pelo baixo índice GWP, mas por ter apresentado maior eficiência térmica em termos de porcentagem para potência líquida (6,92% maior), porém em termos de potência bruta o R245fa obteve um resultado de 12,17% maior. Entretanto alguns pontos necessitam de certos cuidados e adaptações para que a substituição de um fluido por outro seja assertiva e não cause danos ao sistema, o R1233zd-E proporciona uma maior vazão sendo necessários cuidados com vazamento de fluido para que não ocorram menores velocidades de rotação no expensor e consequentemente redução na eficiência do ciclo. Devido ao fato de maior vazão, algumas vantagens são obtidas a partir da utilização do R1233zd-E: A velocidade do expensor pode ser aumentada em comparação com o R245fa para comportar a maior vazão e consequentemente aumento da eficiência do ciclo; Com o aumento da vazão, o coeficiente médio de transferência de calor e a queda de pressão no condensador são maiores para o R1233zd-E o que resulta também em uma maior eficiência do ciclo ORC.

Na busca por obter um ciclo ORC otimizado tanto em termos termodinâmicos como ambientais Hajabdollahi *et al.* (2013) utilizaram um ciclo orgânico de Rankine com fonte térmica provinda de calor residual de motores a diesel. Em sua pesquisa os autores utilizaram como parâmetros de projeto a capacidade nominal do motor diesel, a pressão no evaporador e condensador, potência de saída fixa e a vazão mássica do fluido orgânico. Foram utilizados quatro fluidos orgânicos, sendo eles o R123, o R134a, R245fa e o R22. Após aplicação de um algoritmo genético (NSGA-II, algoritmo genético de classificação não-dominada) para otimizar a eficiência térmica e minimizar o custo de investimento para montagem do sistema, verificou-se que o fluido R123 obteve o melhor resultado em termos ambientais e termodinâmicos, seguido pelo R245fa, R134a e R22 nesta ordem. Entretanto o R123 possui o maior custo de investimento inicial, mas menores custos ambientais e de combustível.

Com os crescentes esforços para reduzir a poluição ambiental em nível global, a busca por altas eficiências térmicas e energéticas passaram a não serem as únicas protagonistas de estudos para melhorar os processos de geração de eletricidade. Estudos sobre a composição e obtenção dos materiais para realização de diversos processos, assim como as matérias primas necessária para manter o sistema funcionando passaram também a serem estudados a fim de se obter maior sustentabilidade nas intervenções humanas no meio ambiente. Desse modo, estudar a composição dos fluidos orgânicos se tornou importante e alguns autores pontuaram os impactos da utilização de alguns fluidos. Banks *et al.* (1998) realizaram uma análise para a fabricação do fluido R227ea em termos de aquecimento global e verificaram que os produtos químicos liberados durante a fabricação do R227ea impactam significativamente o ambiente onde são liberados. Este estudo mostrou que uma análise do ciclo de vida é necessária para calcular os diferentes impactos ambientais causados na fabricação dos insumos necessários para os sistemas de geração de potência.

A análise do ciclo de vida (LCA - Life Cycle Assessment) nada mais é do que uma ferramenta de auxílio para avaliar todas as etapas de um determinado sistema, produto ou serviço, ou seja, é a contabilização de todos os processos e recursos utilizados desde a extração dos recursos do meio ambiente para produção até a destinação final de um sistema, produto ou serviço. Para realizar a montagem de uma análise de ciclo de vida é necessário isolar o sistema que se quer estudar e contabilizar os seguintes recursos: Os recursos que entram no sistema para sua fabricação, os recursos utilizados para manter o sistema operante e por fim o produto ou serviço que

resulta do sistema. A partir deste tipo de análise é possível verificar o impacto ambiental de certos processos e buscar matérias-primas mais sustentáveis. Com essa premissa, Gerbinet, Belboom e Léonard (2014) realizaram uma revisão da aplicação da análise de ciclo de vida para painéis fotovoltaicos com indicadores baseados em tempo de retorno de energia (EPBT – Energy Payback Time) e emissão de CO₂. No desenvolvimento de seu estudo, os autores apresentaram os conceitos básicos da análise do ciclo de vida, segundo a ISO 14040 e 14044, retratando suas quatro fases interdependentes. Na primeira, a fase de definição do escopo e do objetivo, é determinado o volume de controle e as unidades básicas dos componentes a serem analisadas (massa, energia, valor monetário entre outros). Já a segunda fase corresponde ao inventário do ciclo de vida, nesta fase o ciclo de vida é subdividido em elementos e esses elementos são contabilizados em termos de massa e energia. A terceira fase corresponde a avaliação de impactos, ou seja, cada impacto ambiental é contabilizado de acordo com inventário do ciclo de vida. Por último, a interpretação de resultados através de um índice de resultado que deve ser utilizado de acordo com a base de comparação escolhida, como por exemplo, pegada de carbono.

Bicer *et al.* (2016) apuraram quatro diferentes métodos para produção de amônia através da análise do ciclo de vida. Os autores utilizaram diferentes fontes de energia para sua análise sendo elas, hidrelétrica, nuclear, biomassa e incineração de resíduos municipais, a fim de verificar os diferentes níveis de impacto ambiental nas categorias de potencial de aquecimento global, toxicidade humana e depleção abiótica, associado a cada uma das diferentes fontes de energia e métodos de produção. Os autores averiguaram em suas simulações que os processos de produção que utilizaram energia provinda de incineração de resíduos urbanos e hidrelétrica possuem um impacto ambiental menor em relação as outras fontes apresentadas. Os métodos mais eficientes em termos energéticas foram obtidos através da utilização de energia hidrelétrica, nuclear, de biomassa e incineração de resíduos municipais respectivamente. Os métodos mais eficientes em termos de exergia seguiram a mesma ordem, entretanto as menores emissões de CO₂ por quilograma produzido foram obtidas por incineração de resíduos municipais, hidrelétrica, nuclear e de biomassa respectivamente. A partir desses dados concluiu-se que das fontes estudadas, a produção de amônia realizada através de energia hidrelétrica possui o menor impacto ambiental e que, quanto mais renovável for a fonte de energia menor será a pegada ambiental do processo, sendo então necessário substituir

as fontes de energia providas da queima de combustíveis fósseis devido ao fato de não serem renováveis.

Análogo a este tipo de análise ambiental, estudos voltados não apenas para a análise do ciclo de vida de componentes do ciclo ORC como o fluido orgânico de trabalho, mas do sistema de geração de potência em sua totalidade passaram a ser verificados a fim de se viabilizar ambientalmente projetos para plantas de usinas de energia. Seguindo esta vertente, Heberle, Schifflechner e Brüggemann (2016) investigaram o ciclo de vida para um sistema ORC com fonte térmica provida de energia geotérmica utilizada em usinas binárias. Para montagem do ciclo ORC os autores utilizaram um sistema subcrítico e supercrítico de um e dois estágios, considerando na análise de ciclo de vida as perdas do fluido de trabalho e o impacto ambiental associado a cada um dos tipos de ciclo. Buscando melhorar ainda mais a viabilidade ambiental, foram comparados os resultados entre fluidos fluorados e fluidos com baixo GWP analisando a substituição do R245fa e R134a pelos fluidos R1233zd, R1234yf e outros hidrocarbonetos naturais. Aplicando a análise termodinâmica através da segunda lei os autores observaram que nos casos em que foram utilizadas fontes de calor de baixa temperatura, a eficiência pela segunda lei diminuiu em 2% e o impacto ambiental em 78% ao utilizar o R1233zd como substituto ao R245fa, no caso do ciclo supercrítico o R1234yf obteve um aumento de 37% na eficiência calculada pela segunda lei e menores emissões de CO₂. Na condição de maiores temperaturas provida da fonte de calor foi observado um aumento de 7% na eficiência térmica utilizando um ciclo com dois estágios, para o ciclo de um estágio o R1233zd também foi superior ao R245fa obtendo 2% a mais de eficiência exergética e uma redução de emissão de CO₂ na taxa de 78 gCO₂/kWh para 13 gCO₂/kWh, sendo possível observar que todos os fluidos com baixo GWP abordados neste estudo se apresentaram bons substitutos ao R245fa pelo menor impacto no aquecimento global e eficiência térmica calculado pela segunda lei próximos aos do fluido fluorado.

Neste seguimento de abordagem Ding *et al.* (2018), através de um modelo exergoambiental, verificaram a sustentabilidade de um sistema ORC reversível contendo apenas quatro componentes (evaporador, condensador, turbina de um estágio e bomba). Os autores consideraram a perda de fluido de trabalho na sua análise de ciclo de vida e somado a isso o impacto ambiental foi medido de acordo com a destruição energética dos componentes do ciclo, considerando que eles foram fabricados de materiais como aço e cobre e avaliando o mesmo ciclo para diferentes fluidos de

trabalho, sendo eles: R134a, R227ea, R152a e R245fa. Foram obtidos os seguintes resultados referentes ao “impacto ambiental” devido a utilização do ciclo ORC com os diferentes fluidos de trabalho, sendo 13,76% para o R134a, 26,04% para o R227ea, 2,62% para o R152a e 14,77% para o R245fa. Quanto ao impacto ambiental causado pelo vazamento de fluidos, foram obtidos os seguintes resultados: 67,52% para o R134a, 75,62% para o R227ea, 35,71% para o R152a e 68,34% para o R245fa. Considerando tanto o impacto causado pelo fluido como para o sistema ORC que o acompanha, o fluido R245fa apresentou o menor impacto ambiental tanto utilizando o aço quanto o cobre, de modo que o fluido R227ea obteve o maior impacto ambiental. Foi observado também que o cobre contido no sistema não exibiu grande influência no resultado final atrelado ao impacto ambiental, já o aço possui alta significância devido ao fato de ser matéria prima de grande parcela dos componentes. Como alternativa para reduzir os impactos ambientais atrelados a utilização de um ciclo ORC, os autores sugeriram a utilização de um condensador fabricado com materiais mais ecológicos, assim como melhorar os equipamentos que realizam a transferência de calor de modo a compacta-los e utilizar menor quantidade de material em sua fabricação.

Uma das vertentes de análise do ciclo de vida de um componente, produto ou sistema é a análise emergética. Neste tipo de análise, além de serem verificados os impactos ambientais devido às entradas e saídas dos componentes de um determinado sistema ou produto, como é realizado na análise do ciclo de vida (LCA), este impacto é medido em termos emergéticos. Energia nada mais é do que o histórico energético de um determinado sistema ou produto, ou seja, todo o recurso energético extraído do meio ambiente para se produzir algo mensurado em termos de energia solar (emjoule), isto é, a quantidade de energia solar equivalente para se gerar o produto ou serviço em estudo. Liang *et al.* (2016) apresentaram os conceitos de energia para verificar a sustentabilidade da produção de hidrogênio a partir da biomassa. Segundo os autores, para realizar a análise emergética é preciso dividir todos os materiais utilizados na fabricação dos equipamentos e componentes de um sistema ou produto nos seguintes índices de categorias emergéticas: Recursos ambientais renováveis R [J], Recursos ambientais não renováveis N [J], Insumos adquiridos renováveis F_r [J], Insumos adquiridos não renováveis F_n [J] e Produto P [J]. A combinação desses índices fornecem outros índices (índices emergéticos derivados) que são utilizados para medir o impacto ambiental a partir de diversas perspectivas, sendo eles: Rendimento Y [sej] que

representa a energia total requerida por um determinado serviço ou produto, Taxa de rendimento emergético EYR [adimensional] que mede a capacidade do sistema de explorar recursos locais e torna-lo disponível para investir em recursos externos, Transformada T_r [sej/J] que representa o consumo emergético por unidade, Taxa de carregamento ambiental ELR [adimensional] que mede o carregamento ambiental do sistema, Taxa de investimento ambiental EIR [adimensional] que mede o nível emergético de investimento e o Índice emergético de sustentabilidade EIS [adimensional] que mede a sustentabilidade de um produto, processo ou serviço. O índice emergético de sustentabilidade é dividido em três categorias: Se o índice emergético for menor do que um o processo é considerado sustentável por um curto período; Se o índice emergético de sustentabilidade estiver entre um e cinco, o sistema é considerado sustentável por um médio período; Se o índice for maior do que cinco é considerado sustentável por um longo período.

A partir disso, Brown, Rauei e Ulgiati (2012) estudaram a análise do ciclo de vida e energia tanto para a geração de energia elétrica a partir de um ciclo termodinâmico como para geração de eletricidade a partir de células fotovoltaicas, com o intuito de verificar o desempenho ambiental de ambos os processos. Primeiramente os autores utilizaram o conceito de análise de ciclo de vida para mapear todas as fases do sistema e os componentes de suas respectivas fases a serem contabilizadas em sua análise, tanto para geração térmica quanto fotovoltaica. Após a análise do ciclo de vida e utilizando o índice “Taxa de Rendimento Emergético” os autores compararam os resultados obtidos para um período de 30 anos, sendo eles: Para uma usina elétrica proveniente da queima de óleo como combustível para o ciclo térmico, em termos emergéticos, a eletricidade gerada foi de $5,69 \cdot 10^5$ sej/J considerando o trabalho humano envolvido no processo, sem o trabalho humano o resultado emergético relacionado a produção de energia elétrica foi de $5,11 \cdot 10^5$ sej/J; Em contrapartida, utilizando as células fotovoltaicas o resultado emergético foi de $1,45 \cdot 10^5$ sej/J considerando o trabalho humano envolvido no processo e $7,93 \cdot 10^4$ sej/J desconsiderando o trabalho humano; Já aplicando a taxa de rendimento emergético os resultados foram de 6,8 para o sistema térmico e 2,2 para o sistema fotovoltaico. Com esses resultados obtidos pelos autores foi constatado que a taxa de rendimento emergético para o ciclo térmico foi maior, mostrando que em termos de investimento ele é mais vantajoso em relação ao sistema fotovoltaico, que atualmente é caro para se

fabricar. Já em termos emergéticos, em nível de carregamento ambiental apresentado pelo resultado emergético do sistema em si, os valores obtidos para o sistema fotovoltaico são menores, mostrando que seu impacto ambiental é menor. Isso ocorre devido ao fato de que o sistema fotovoltaico depende apenas da luz solar (fonte renovável) para gerar eletricidade após a fabricação da planta de energia, enquanto o sistema térmico utiliza óleo (fonte não renovável) para geração de eletricidade.

Merlin e Boileau (2017) utilizaram a análise emergética para determinar a sustentabilidade de duas pequenas plantas de biogás para um longo período, a fim de melhorar a eficiência do sistema e diminuir o impacto ambiental atrelado as planta de biogás. Para este estudo, dois diferentes sistemas de biogás foram utilizados sendo eles um digestor proveniente de efluentes de laticínios e outro um sistema de cogeração de fonte agrícola com potência nominal de 45 kWe. Primeiramente os autores realizaram a análise energética para depois aplicar a análise emergética, contabilizando todos os insumos e trabalho humano utilizados em ambos os processos. Foi constatado que, a eco eficiência dos processos foram baixas devido a baixa produção de biogás e alto consumo de hidróxido de sódio, enquanto os índices emergéticos para o digestor proveniente de resíduos do laticínio foram melhores em comparação com o sistema de cogeração agrícola, sendo então mais eco eficiente. Foi observado também que a entropia diminui com o aumento da eficiência e sustentabilidade dos processos.

Utilizando um ciclo termodinâmico com cogeração baseado em gás e turbina para um sistema de 20 anos operando 7.446 horas por ano, Aghbashlo e Rosen (2018) utilizaram a análise exergética e emergética para verificar a sustentabilidade do sistema para longos períodos concatenando os dados energéticos, financeiros e ecológicos para descrever seu sistema. Para tal análise, os autores definiram alguns passos a serem seguidos a fim de se obter resultados emergéticos em termos econômicos e ambientais, sendo eles de forma resumida: 1º - Determinação do volume de controle do sistema a ser analisado; 2º - Determinação das propriedades termodinâmicas; 3º - Cálculo dos fluxos de exergia e energia; 4º - Cálculo da eficiência exergética e da decomposição exergética; 5º - Obtenção dos dados emergéticos em termos econômicos e ambientais; 6º - Determinação da quantidade de material utilizado na fabricação do sistema; 7º - Cálculo da emergia relacionada aos termos monetários e ecológicos; 8º - Contabilização dos dados emergéticos; 9º - Avaliação dos resultados obtidos. O intuito dos autores não foi obter um dado emergético específico para classificar o sistema de estudo, mas sim variar os parâmetros do seu sistema a fim de verificar como os passos descritos

anteriormente afetam a análise emergética. Pelos resultados experimentais obtidos pelos autores, a análise emergética pode ser utilizada como ferramenta adicional para avaliar a sustentabilidade de um sistema e a análise exergética também pode ser utilizada como método adicional para contribuir com a união dos aspectos termodinâmicos, financeiros e ecológicos do sistema.

Como ferramenta adicional à análise termodinâmica, Yang *et al.* (2011) estudaram a energia relacionada a utilização de mandioca como matéria prima para a produção de etanol (CFE) em substituição aos derivados de petróleo. Após realizar a análise termodinâmica e a análise de ciclo de vida, os autores realizaram a contabilização emergética a partir da transformada de modo que, foi obtido um índice emergético de sustentabilidade igual a 0,42. Foi observado ao analisar os elementos constituintes do combustível que, os insumos não renováveis representam 71% de todos os constituintes do combustível, fator este que torna o sistema menos sustentável em relação aos sistemas que possuem maior parcela de componentes atrelados a fontes renováveis. A transformada do (CFE) foi menor que do biodiesel e etanol provindos de milho e trigo, entretanto maior que os combustíveis derivados de petróleo. Já o índice emergético de sustentabilidade obtido para o (CFE) foi de 0,42, enquanto para o etanol de trigo foi de 0,31 e de milho 0,15, sendo então o (CFE) mais sustentável em termos emergéticos.

Na última década a análise emergética aplicada a ciclos termodinâmicos passou a ser realizada com mais frequência, fato este que ocorreu devido aos grandes esforços mundiais destinados a redução do impacto ambiental causado pelas intervenções humanas. Sabendo que não é possível deixar de realizar certas atividades econômicas como por exemplo, passar a utilizar energia elétrica produzida apenas por fontes renováveis como solar e dos ventos, certas práticas ainda se manterão por muito tempo até que toda cadeia produtiva seja substituída por fontes e processos 100% renováveis, novas alternativas precisam ser estudadas e comparadas com as atuais e é neste ponto que análise emergética é introduzida. Sha e Hurme (2012) examinaram a energia de processos de biomassa e cogeração combinando calor e energia baseados em carvão. Como parte da análise emergética, foi realizada a contabilização de todos os recursos necessários para operação do sistema (combustível, investimento, trabalho entre outros) em termos solar, a fim de analisar por um volume de controle em termos de biosfera o quanto de energia foi retirada do meio ambiente para fornecer energia elétrica como produto do processo estudado. Comparando os processos de biomassa e cogeração por

carvão os autores verificaram que, em termos emergéticos o processo a base de biomassa é 3,3 vezes mais eficiente do que o processo com carvão de modo que, utilizando biomassa como fonte de calor o meio ambiente é 77% menos explorado em comparação com a utilização do carvão. Foi possível verificar também que o índice de sustentabilidade para a geração por biomassa é 15 vezes maior em relação ao sistema de cogeração de carvão. Em termos de componentes emergéticos, o combustível, o transporte e oxigênio utilizado na reação química da queima representam 80% da energia no processo de geração por biomassa, enquanto os mesmos componentes do processo de cogeração por carvão representam 90% da energia do sistema.

Com o intuito de verificar a sustentabilidade ambiental de um ciclo básico de Rankine, Zhang *et al.* (2018) aplicaram a análise emergética para um sistema ORC com fonte de calor provinda de calor residual da queima de carvão. Utilizando o fluido R134a como fluido de trabalho e um ciclo contendo um evaporador, um condensador, uma bomba e uma turbina, os autores verificaram a sustentabilidade do sistema em termos emergéticos a partir de três passos. De início foi realizada a análise termodinâmica com o intuito de se obter o comportamento térmico do ciclo e assim poder dimensionar os seus componentes, para então obter suas respectivas massas. Após isso, foi realizada a análise do ciclo de vida do sistema com o intuito de aplicar um volume de controle para determinar quais foram os tipos de recursos utilizados ao longo da vida útil da planta de geração de energia, para isso o sistema foi separado em três fases, sendo elas: Primeiro a fase de construção, onde foram contabilizados todos os recursos necessários para a fabricação dos componentes do ciclo; Segundo a fase de operação, onde foram contabilizados os recursos necessários para manter a usina de geração de energia em funcionamento por um período de 20 anos em regime de trabalho de 7.000 horas por ano; E terceiro a fase de desativação, onde foram contabilizados os recursos necessários para destinar os componentes da usina para seus respectivos descartes. Por fim, sabendo a quantidade de cada elemento que compõe os equipamentos e fluido utilizados no ciclo, aplicando as definições de transformada e energia, foram obtidos os dados emergéticos para cada componente e fase do ciclo para que, utilizando os índices emergéticos, fosse possível obter a análise ambiental a partir da energia. Com este procedimento os autores obtiveram que, para o ciclo básico ORC operando com fluido R134a a taxa de rendimento emergético [*EYR*] foi de 197,52 e o índice emergético de sustentabilidade [*EIS*] foi de 3,97. Estes resultados foram comparados com os índices emergéticos de outras seis fontes de energia diferentes,

sendo observado que o índice emergético de sustentabilidade para o ciclo ORC é menor em comparação com geração proveniente de fontes renováveis, entretanto foi maior em comparação a geração proveniente da queima de combustíveis fósseis, sendo então uma alternativa a essas fontes não renováveis. O índice emergético obtido ficou dentro da faixa de um a cinco, classificando o sistema como sustentável por um médio período. Foi observado também que, a emergia relacionada com o fluido de trabalho ficou na faixa dos 13% da emergia do total do sistema, revelando que o fluido de trabalho não deve ser ignorado devido a sua relevância na emergia total do sistema.

A partir desta linha de desenvolvimento, os estudos relatados neste capítulo apresentam a importância de não apenas buscar modelos de sistemas, serviços ou produtos mais eficientes em termos energéticos, mas também de se obter sistemas, serviços ou produtos mais sustentáveis em termos ambientais. A análise emergética se apresenta como um tipo de análise termodinâmica que pode ser somada as análises tradicionais de eficiência energética, pois através dela, com o auxílio da análise do ciclo de vida, é possível investigar um a um os componentes de um determinado sistema e mensurar toda a emergia utilizada desde a fabricação até o descarte dos mesmos (histórico energético), contabilizando assim o impacto de sua utilização em termos de ecossistema e biosfera assim como em termos monetários buscando uma maior viabilidade de sua utilização. Com o resultado desse tipo de análise, é possível verificar a necessidade de substituição de certos recursos provindos de fontes menos renováveis por recursos mais renováveis e assim, melhorar a sustentabilidade do sistema, serviço ou produto.

Advindo destas relações, este estudo tem como objetivo realizar novos estudos para verificar a sustentabilidade de diferentes ciclos orgânicos de Rankine utilizando diferentes fluidos de trabalho para que, a partir da análise emergética desses ciclos, eles sejam classificados em uma escala de nível de sustentabilidade sendo, sustentável a curto, médio e longo prazo através do índice emergético de sustentabilidade [*EIS*], abordando não apenas ciclos reversíveis contendo componentes básicos como evaporador, condensador, turbina e bomba que já foram alvos de estudos semelhantes, mas também apresentando uma abordagem inédita na literatura contendo a análise emergética para ciclos irreversíveis com estruturas mais elaboradas como para um ciclo regenerativo com aquecimento fechado e sistema com turbina de mais de um estágio.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM FÍSICA

3.1 – ANÁLISE TERMODINÂMICA

Neste trabalho foram abordados quatro tipos de sistema de geração a vapor. O primeiro um ciclo ORC reversível, depois um ciclo ORC irreversível, após este um ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado e por último um ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado. A seguir serão apresentadas as análises termodinâmicas para cada um dos ciclos citados.

3.1.1 – Ciclo ORC reversível

Por definição, um ciclo orgânico de Rankine (ORC) consiste em um sistema de geração de potência a vapor através da utilização de fluidos orgânicos, que possuem como característica um ponto de ebulição menor em comparação a outros fluidos de trabalho. Um sistema ORC reversível é composto por uma bomba, uma turbina, um condensador e um evaporador conforme modelo físico apresentado pela Fig. (3.1.a):

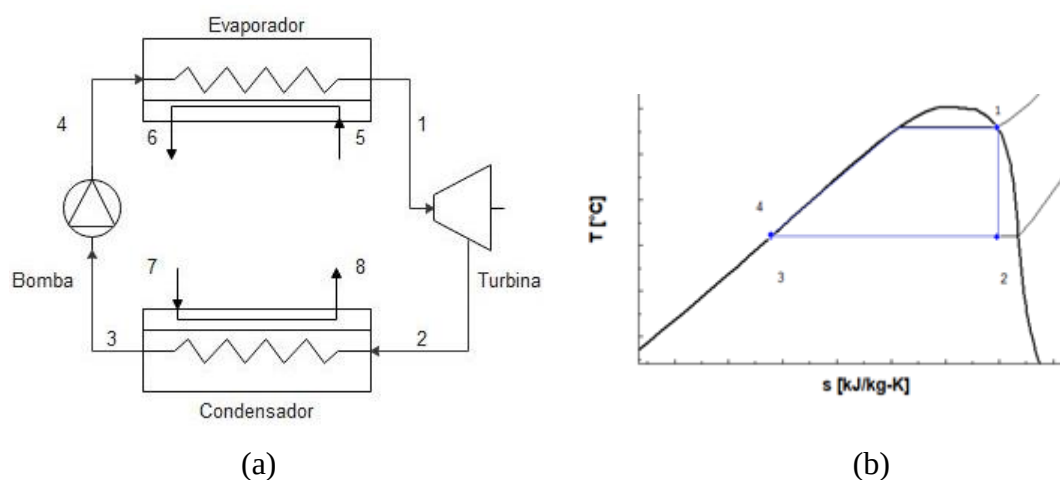


Figura 3.1 – (a) Modelo de um ciclo ORC reversível. (b) Diagrama T-s para um ciclo ORC reversível.

Para que o ciclo ORC seja considerado reversível, algumas hipóteses precisam ser satisfeitas, sendo elas as seguintes:

- (i) Efeitos relacionados às variações de energia cinética e potencial são considerados desprezíveis;
- (ii) Processos ocorrem em regime permanente;
- (iii) Perdas de energia na forma de calor e perdas de cargas nas tubulações são consideradas desprezíveis;
- (iv) Vazão mássica invariante no sistema;
- (v) Os processos que ocorrem na bomba e turbina são admitidos isentrópicos;
- (vi) Volumes de controle adiabáticos.

A partir dessas hipóteses é possível aplicar a primeira lei da termodinâmica em conjunto com a conservação da massa para cada um dos componentes apresentados na Fig. (3.1.a).

3.1.1.1 – Evaporador

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo o evaporador e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “1” e entrando no volume de controle em “4”, conforme Fig. (3.1.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{eva} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_1 - h_4) + (v_1^2 - v_4^2) + 2 \cdot g \cdot (z_1 - z_4)]}{2} \quad (3.1)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{m}} = (h_1 - h_4) \quad (3.2)$$

No evaporador, o processo de transferência de calor entre o fluido orgânico e o fluido aquecido pode ser expresso da seguinte forma ao aplicar a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle em regime

permanente, considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado obtendo-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) + \dot{m}_{\text{agua},q} \cdot (h_6 - h_5) \quad (3.3)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (vi) e desprezando o $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) + \dot{m}_{\text{agua},q} \cdot (h_6 - h_5) \quad (3.4)$$

3.1.1.2 – Turbina

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.1.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_t + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_2 - z_1)]}{2} \quad (3.5)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) \quad (3.6)$$

3.1.1.3 – Condensador

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo o condensador e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “3” e entrando no volume de controle em “2”, conforme Fig. (3.1.a) obtém-se:

$$(-\dot{Q}_{cond}) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_3 - h_2) + (v_3^2 - v_2^2) + 2 \cdot g \cdot (z_3 - z_2)]}{2} \quad (3.7)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{m}} = (h_2 - h_3) \quad (3.8)$$

No condensador, o processo de transferência de calor entre o fluido orgânico e o fluido resfriado pode ser expresso da seguinte forma, aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle em regime permanente, considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado obtendo-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (h_8 - h_7) \quad (3.9)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (vi) e desprezando o termo $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$0 = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (h_8 - h_7) \quad (3.10)$$

3.1.1.4 – Bomba

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a bomba e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “4” e entrando no volume de controle em “3”, conforme Fig. (3.1.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_4 - h_3) + (v_4^2 - v_3^2) + 2 \cdot g \cdot (z_4 - z_3)]}{2} \quad (3.11)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = (h_4 - h_3) \quad (3.12)$$

A eficiência térmica do ciclo pode ser mensurada pela relação entre a potência líquida do ciclo e a taxa de energia fornecida ao ciclo, ou seja:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{líquido}}}{\dot{Q}_{\text{eva}}} \quad (3.13)$$

onde o termo $\dot{W}_{\text{líquido}}$ corresponde a potência líquida do ciclo, ou seja, $\dot{W}_t - \dot{W}_b$.

3.1.2 – Ciclo ORC irreversível

O ciclo orgânico de Rankine (ORC) irreversível é composto por uma bomba, uma turbina, um condensador e um evaporador e é semelhante ao modelo físico apresentado pela Fig. (3.1.a) abordado na Seção (3.1.1). A diferença entre ambos está no efeito de irreversibilidades presentes tanto na bomba quanto na turbina, fazendo com que quando o fluido de trabalho escoe por esses componentes (sendo expandindo nas turbinas ou comprimindo na bomba) haja um aumento de entropia, acarretando em uma diminuição do trabalho líquido final do ciclo devido à potência consumida para vencer as irreversibilidades. Este aumento de entropia pode ser visualizado no diagrama T - s da Fig. (3.2):

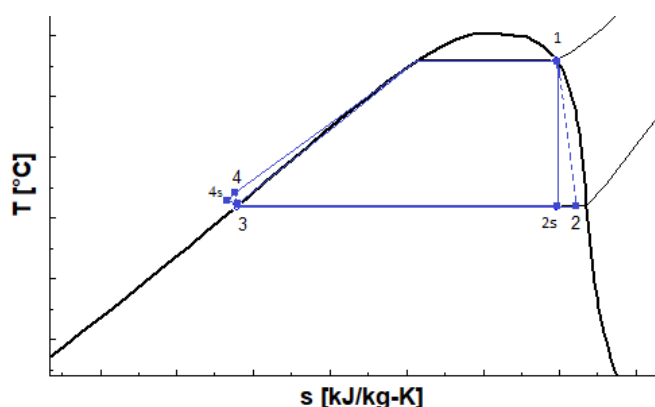


Figura 3.2 – Diagrama T - s para um ciclo ORC irreversível.

Para o ciclo ORC irreversível, foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- (i) Efeitos relacionados às variações de energia cinética e potencial são considerados desprezíveis;
- (ii) Processos ocorrem em regime permanente;
- (iii) Perdas de energia na forma de calor e perdas de cargas nas tubulações são consideradas desprezíveis;
- (iv) Vazão mássica invariante no sistema;
- (v) Volumes de controle adiabáticos.

A primeira lei da termodinâmica se aplica da mesma forma como foi apresentado na Seção (3.1.1), exceto na bomba e turbina onde o processo não ocorre de forma isentrópica, considerando assim as irreversibilidades nestes dois componentes.

3.1.2.1 – Turbina

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.2) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_t + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_2 - z_1)]}{2} \quad (3.14)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) \quad (3.15)$$

Já para o trabalho considerando as irreversibilidades da turbina, com o volume de controle envolvendo a turbina e o fluxo do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2s” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.2) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_t + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_{2s} - h_1) + (v_{2s}^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_{2s} - z_1)]}{2} \quad (3.16)$$

onde o índice “s” representa a propriedade avaliada com irreversibilidades correspondente ao estado adiabático calculado anteriormente.

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} \right)_s = (h_1 - h_{2s}) \quad (3.17)$$

Por definição, a eficiência isentrópica da turbina é dada por:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_t / \dot{m}}{(\dot{W}_t / \dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.18)$$

3.1.2.2 – Bomba

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a bomba e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “4” e entrando no volume de controle em “3”, conforme Fig. (3.2) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_4 - h_3) + (v_4^2 - v_3^2) - 2 \cdot g \cdot (z_4 - z_3)]}{2} \quad (3.19)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = (h_4 - h_3) \quad (3.20)$$

Já para o trabalho considerando as irreversibilidades da bomba, com o volume de controle envolvendo a bomba e o fluxo do fluido de trabalho saindo do volume de

controle em “4s” e entrando no volume de controle em “3”, conforme Fig. (3.2) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_{4s} - h_3) + (v_{4s}^2 - v_3^2) - 2 \cdot g \cdot (z_{4s} - z_3)]}{2} \quad (3.21)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} \right)_s = (h_{4s} - h_3) \quad (3.22)$$

Por definição, a eficiência isentrópica da bomba é dada por:

$$\eta_b = \frac{\dot{W}_b / \dot{m}}{(\dot{W}_b / \dot{m})_s} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (3.23)$$

3.1.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

O ciclo orgânico de Rankine (ORC) reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado é composto por uma bomba, duas turbinas (dois estágios), um condensador, um evaporador, um aquecedor de alimentação fechado e uma válvula de expansão conforme modelo físico apresentado pela Fig. (3.3.a).

Para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- (i) Efeitos relacionados às variações de energia cinética e potencial são considerados desprezíveis;
- (ii) Processos ocorrem em regime permanente;
- (iii) Perdas de energia na forma de calor e perdas de cargas nas tubulações são consideradas desprezíveis;
- (iv) Vazão mássica invariante no sistema;
- (v) Os processos que ocorrem na bomba e turbina são admitidos isentrópicos;
- (vi) Volumes de controle adiabáticos.

A partir dessas hipóteses é possível aplicar a primeira lei da termodinâmica e a conservação da massa para cada um dos componentes apresentados na Fig. (3.3.a).

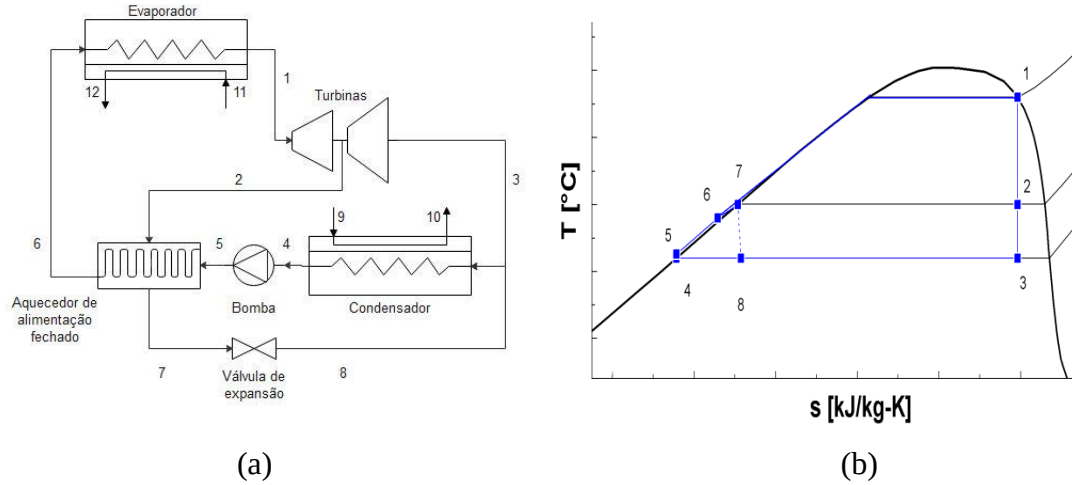


Figura 3.3 – (a) Modelo de um ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado. (b) Diagrama T - s para um ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado.

3.1.3.1 – Evaporador

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo o evaporador e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “1” e entrando no volume de controle em “6”, conforme Fig. (3.3.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{eva} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_1 - h_6) + (v_1^2 - v_6^2) + 2 \cdot g \cdot (z_1 - z_6)]}{2} \quad (3.24)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{m}} = (h_1 - h_6) \quad (3.25)$$

No evaporador, o processo de transferência de calor entre o fluido orgânico e o fluido aquecido pode ser expresso da seguinte forma ao aplicar a 1ª lei da

termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle em regime permanente, considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado, obtendo-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) + \dot{m}_{\text{água},q} \cdot (h_{12} - h_{11}) \quad (3.26)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (vi) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$0 = \dot{m} \cdot (h_1 - h_6) + \dot{m}_{\text{água},q} \cdot (h_{12} - h_{11}) \quad (3.27)$$

3.1.3.2 – Turbina de primeiro estágio

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina de primeiro estágio e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.3.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t1} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_2 - z_1)]}{2} \quad (3.28)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) \quad (3.29)$$

3.1.3.3 – Turbina de segundo estágio

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina de segundo estágio e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “3” e entrando no volume de controle em “2”, conforme Fig. (3.3.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t2} + \dot{m}_3 \cdot \frac{[2 \cdot (h_3 - h_2) + (v_3^2 - v_2^2) + 2 \cdot g \cdot (z_3 - z_2)]}{2} \quad (3.30)$$

onde $\dot{m}_3$ corresponde a vazão mássica restante no segundo estágio da turbina, sendo $\dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2$ e $\dot{m}_2$ corresponde a vazão mássica extraída no primeiro estágio da turbina.

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}_3} = (h_2 - h_3) \quad (3.31)$$

3.1.3.4 – Condensador

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para volume de controle envolvendo o condensador e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “4” e entrando no volume de controle em “3” e em “8”, conforme Fig. (3.3.a) obtém-se:

$$\begin{aligned} (-\dot{Q}_{cond}) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot h_4 + v_4^2 + 2 \cdot g \cdot (z_4)]}{2} - \dot{m}_2 \cdot \frac{[2 \cdot h_8 + v_8^2 + 2 \cdot g \cdot (z_8)]}{2} + \\ - \dot{m}_3 \cdot \frac{[2 \cdot h_3 + v_3^2 + 2 \cdot g \cdot (z_3)]}{2} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{m}} = -h_4 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}} \cdot h_8 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}} \cdot h_3 \quad (3.33)$$

No condensador, o processo de transferência de calor entre o fluido orgânico e o fluido resfriado pode ser expresso da seguinte forma, aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle em regime permanente, considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado obtendo-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} = \dot{m} \cdot h_4 - \dot{m}_2 \cdot h_8 - \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (h_{10} - h_9) \quad (3.34)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (vi) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$0 = \dot{m} \cdot h_4 - \dot{m}_2 \cdot h_8 - \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (h_{10} - h_9) \quad (3.35)$$

3.1.3.5 – Bomba

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a bomba e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “5” e entrando no volume de controle em “4”, conforme Fig. (3.3.a) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_5 - h_4) + (v_5^2 - v_4^2) - 2 \cdot g \cdot (z_5 - z_4)]}{2} \quad (3.36)$$

Pelas hipóteses (i) e (ii) e desprezando o termo $\dot{Q}_{vc}$ obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = (h_5 - h_4) \quad (3.37)$$

3.1.3.6 – Aquecedor de alimentação fechado

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo o aquecedor de alimentação fechado e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “6” e em “7” e entrando no volume de controle em “2” e em “5”, conforme Fig. (3.3.a), considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado obtém-se:

$$\dot{Q}_{af} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot h_6 + v_6^2 + 2 \cdot g \cdot (z_6)]}{2} + \dot{m}_2 \cdot \frac{[2 \cdot h_7 + v_7^2 + 2 \cdot g \cdot (z_7)]}{2} +$$

$$- \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot h_5 + v_5^2 + 2 \cdot g \cdot (z_5)]}{2} - \dot{m}_2 \cdot \frac{[2 \cdot h_2 + v_2^2 + 2 \cdot g \cdot (z_2)]}{2} \quad (3.38)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$\dot{Q}_{af} = \dot{m} \cdot h_6 + \dot{m}_2 \cdot h_7 - \dot{m} \cdot h_5 - \dot{m}_2 \cdot h_2 \quad (3.39)$$

Considerando que o calor específico do fluido de trabalho é constante, obtém-se:

$$\dot{Q}_{af} = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (3.40)$$

onde $c_{p,f}$ corresponde ao calor específico médio do fluido de trabalho entre a temperatura de filme dos estados (5) e (6) apresentados na Fig. (3.3.a), $T_{f,sai}$ corresponde a temperatura do estado (6) da Fig. (3.3.a) e $T_{f,ent}$ corresponde a temperatura do estado (5) da Fig. (3.3.a).

No aquecedor de alimentação fechado é possível obter a vazão mássica extraída pela turbina de primeiro estágio, aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle em regime permanente, considerando o trocador de calor do tipo casco e tubo com fluxo cruzado, obtendo-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{vc} = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot h_6 + v_6^2 + 2 \cdot g \cdot (z_6)]}{2} + \dot{m}_2 \cdot \frac{[2 \cdot h_7 + v_7^2 + 2 \cdot g \cdot (z_7)]}{2} +$$

$$- \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot h_5 + v_5^2 + 2 \cdot g \cdot (z_5)]}{2} - \dot{m}_2 \cdot \frac{[2 \cdot h_2 + v_2^2 + 2 \cdot g \cdot (z_2)]}{2} \quad (3.41)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (vi) e desprezando o termo $\dot{W}_{vc}$ obtém-se:

$$0 = \dot{m} \cdot (h_6 - h_5) + \dot{m}_2 \cdot (h_7 - h_2) \quad (3.42)$$

3.1.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

O ciclo orgânico de Rankine (ORC) irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado é composto por uma bomba, duas turbinas (dois estágios), um condensador, um evaporador, um aquecedor de alimentação fechado e uma válvula de expansão e é semelhante ao modelo físico apresentado pela Fig. (3.3.a) abordado na Seção (3.1.3). A diferença entre ambos está no efeito das irreversibilidades presentes tanto na bomba quanto na turbina, fazendo com que quando o fluido de trabalho escoe por esses componentes (sendo expandindo nas turbinas ou comprimindo na bomba) haja um aumento de entropia, acarretando em uma diminuição do trabalho líquido final do ciclo devido à potência consumida para vencer as irreversibilidades. Este aumento de entropia pode ser visualizado no diagrama T - s da Fig. (3.4):

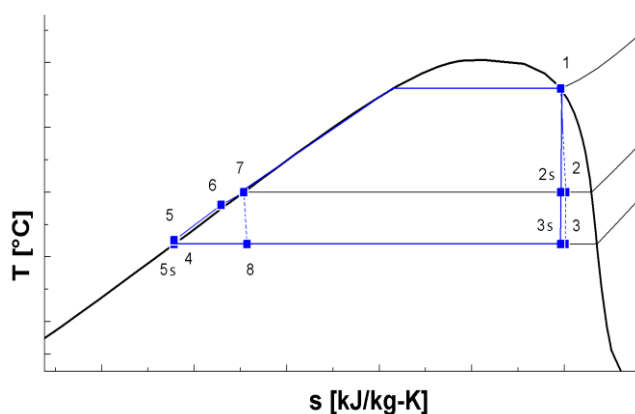


Figura 3.4 – Diagrama T - s para um ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado.

Para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- (i) Efeitos relacionados às variações de energia cinética e potencial são considerados desprezíveis;
- (ii) Processos ocorrem em regime permanente;
- (iii) Perdas de energia na forma de calor e perdas de cargas nas tubulações são consideradas desprezíveis;
- (iv) Vazão mássica invariante no sistema;
- (v) Volumes de controle adiabáticos.

A primeira lei da termodinâmica se aplica da mesma forma como foi apresentado na Seção (3.1.3), exceto na bomba e turbinas onde o processo não ocorre de forma isentrópica, considerando assim as irreversibilidades nestes componentes.

3.1.4.1 – Turbina de primeiro estágio

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina de primeiro estágio e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.4) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t1} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_2 - z_1)]}{2} \quad (3.43)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) \quad (3.44)$$

Já para o trabalho considerando as irreversibilidades da turbina, com o volume de controle envolvendo a turbina de primeiro estágio e o fluxo do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “2s” e entrando no volume de controle em “1”, conforme Fig. (3.4) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t1} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_{2s} - h_1) + (v_{2s}^2 - v_1^2) + 2 \cdot g \cdot (z_{2s} - z_1)]}{2} \quad (3.45)$$

onde o índice “s” representa a propriedade avaliada com irreversibilidades correspondente ao estado adiabático calculado anteriormente.

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_{t1}}{\dot{m}} \right)_s = (h_1 - h_{2s}) \quad (3.46)$$

Por definição, a eficiência isentrópica da turbina de primeiro estágio é dada por:

$$\eta_{t1} = \frac{\dot{W}_{t1}/\dot{m}}{(\dot{W}_{t1}/\dot{m})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3.47)$$

3.1.4.2 – Turbina de segundo estágio

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a turbina de segundo estágio e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “3” e entrando no volume de controle em “2”, conforme Fig. (3.4) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t2} + \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_3 - h_2) + (v_3^2 - v_2^2) + 2 \cdot g \cdot (z_3 - z_2)]}{2} \quad (3.48)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}} = (h_2 - h_3) \quad (3.49)$$

Já para o trabalho considerando as irreversibilidades da turbina, com o volume de controle envolvendo a turbina de segundo estágio e o fluxo do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “3s” e entrando no volume de controle em “2”, conforme Fig. (3.4) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + \dot{W}_{t2} + \dot{m}_3 \cdot \frac{[2 \cdot (h_{3s} - h_2) + (v_{3s}^2 - v_2^2) + 2 \cdot g \cdot (z_{3s} - z_2)]}{2} \quad (3.50)$$

onde $\dot{m}_3$ corresponde a vazão mássica extraída do segundo estágio da turbina, sendo $\dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2$ e $\dot{m}_2$ corresponde a vazão mássica extraída no primeiro estágio da turbina.

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_{t2}}{\dot{m}_3} \right)_s = (h_2 - h_{3s}) \quad (3.51)$$

Por definição, a eficiência isentrópica da turbina de segundo estágio é dada por:

$$\eta_{t2} = \frac{\dot{W}_{t2}/\dot{m}_3}{(\dot{W}_{t2}/\dot{m}_3)_s} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}} \quad (3.52)$$

3.1.4.3 – Bomba

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica e a conservação da massa para um volume de controle envolvendo a bomba e os fluxos do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “5” e entrando no volume de controle em “4”, conforme Fig. (3.4) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_5 - h_4) + (v_5^2 - v_4^2) - 2 \cdot g \cdot (z_5 - z_4)]}{2} \quad (3.53)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = (h_5 - h_4) \quad (3.54)$$

Já para o trabalho considerando as irreversibilidades da bomba, com o volume de controle envolvendo a bomba e o fluxo do fluido de trabalho saindo do volume de controle em “5s” e entrando no volume de controle em “4”, conforme Fig. (3.3) obtém-se:

$$\dot{Q}_{vc} = \frac{dE_{vc}}{dt} + (-\dot{W}_b) = \dot{m} \cdot \frac{[2 \cdot (h_{5s} - h_4) + (v_{5s}^2 - v_4^2) - 2 \cdot g \cdot (z_{5s} - z_4)]}{2} \quad (3.55)$$

Pelas hipóteses (i), (ii) e (v) obtém-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} \right)_s = (h_{5s} - h_4) \quad (3.56)$$

Por definição, a eficiência isentrópica da bomba é dada por:

$$\eta_b = \frac{\dot{W}_b / \dot{m}}{(\dot{W}_b / \dot{m})_s} = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \quad (3.57)$$

3.2 – MASSA DOS COMPONENTES DO CICLO

Conforme apresentado na Seção (3.1), um ciclo ORC é composto por evaporador, condensador, aquecedor, turbina, bomba e fluido de trabalho. Para se realizar uma análise emergética de um ciclo ORC faz-se necessário quantificar a massa de cada um desses componentes para avaliar o impacto ambiental relacionado à fabricação dos mesmos. A massa desses componentes pode ser determinada conforme o procedimento a seguir.

3.2.1 – Evaporador, condensador e aquecedor de alimentação fechado

Conforme Zhang *et al.* (2018) as massas do evaporador, condensador e aquecedor de alimentação fechado podem ser calculadas a partir da seguinte expressão:

$$m_{(eva/con/af)} = \rho_{(eva/con/af)} A_{(eva/con/af)} \delta_{(eva/con/af)} \quad (3.58)$$

onde $\rho_{(eva/con/af)}$ é a massa específica do material no qual os equipamentos são fabricados, $\delta_{(eva/con/af)}$ é a espessura das placas do material utilizado e $A_{(eva/con/af)}$ é a área do trocador de calor.

A área dos trocadores de calor pode ser calculada pela metodologia MLDT, na qual a área de troca térmica é expressa pela seguinte expressão:

$$A_{(eva/con/af)} = \frac{\dot{Q}_{(eva/con/af)}}{U_{(eva/con/af)} \Delta T_{ml,(eva/con/af)}} \quad (3.59)$$

onde $U_{(eva/con/af)}$ é o coeficiente global de transferência de calor e $\Delta T_{ml,(eva/con/af)}$ é a média logarítmica da diferença de temperatura nos trocadores de calor.

3.2.2 – Turbina e bomba

Zhang *et al.* (2018) sugerem o cálculo da massa da turbina e da bomba através da seguinte expressão:

$$m_{(t/b)} = \alpha_{(t/b)} \dot{W}_{(t/b)} \quad (3.60)$$

onde $\alpha_{(t/b)}$ corresponde a massa requerida pela turbina/bomba por kW e $\dot{W}_{(t/b)}$ é a potência produzida/consumida no ciclo.

3.2.3 – Massa do fluido de trabalho

A massa total do fluido de trabalho m_{ft} , conforme o trabalho de Zhang *et al.* (2018), pode ser calculada como:

$$m_{ft} = L_{ft} (\beta \dot{W}_t) + \beta \dot{W}_t \quad (3.61)$$

onde L_{ft} corresponde a perda de fluido de trabalho no ciclo em termo percentuais e β corresponde a massa de fluido de trabalho requerida pela turbina por kW de potência produzida.

3.3 – ANÁLISE EMERGÉTICA

Para iniciar a análise de emergia e assim determinar a sustentabilidade de um sistema através de índices emergéticos, de acordo com Odum (1996), faz-se necessário definir a janela ambiental de um sistema como parte da análise do ciclo de vida com o intuito de unir, em uma mesma análise, uma visão geral em pequena escala de questões econômicas e ambientais, simplificando assim as verificações de modo a conter os itens de maior importância e impacto no sistema estudado, no caso o ciclo ORC. Após a

montagem da janela ambiental, tendo separadamente os recursos utilizados em cada uma das etapas do ciclo de vida do sistema é possível então separar todos os insumos utilizados na construção da planta de geração de eletricidade a fim de, com os índices emergéticos, mensurar os ciclos com seus respectivos fluidos de trabalho em termos de sustentabilidade. Cada uma dessas etapas será apresentada a seguir.

3.3.1 – Janela ambiental/Análise de ciclo de vida

O objetivo da janela ambiental é delimitar o volume de controle do sistema a ser analisado em termos emergéticos, a fim de separar os insumos utilizados em cada fase presente no volume de controle até alcançar o produto/serviço final. Neste trabalho o volume de controle corresponde a planta de geração de potência e o produto final a geração de eletricidade. A janela ambiental para um ciclo ORC genérico pode ser visualizada através da Fig. (3.5):

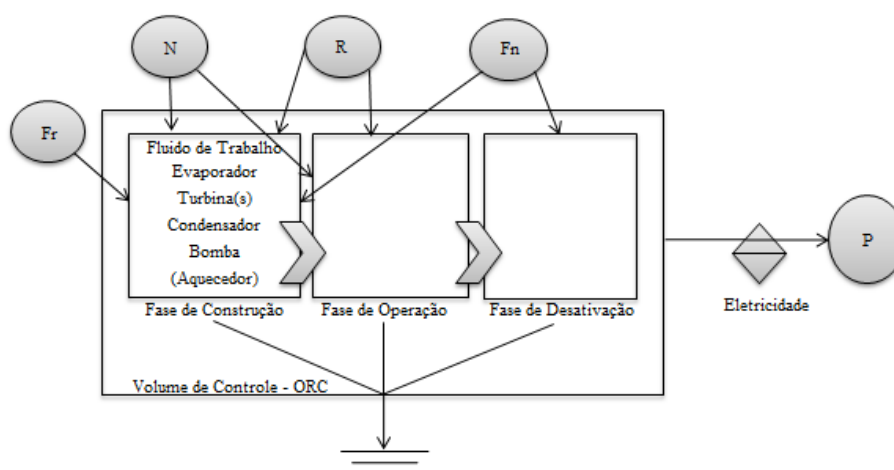


Figura 3.5 – Janela ambiental para um ciclo ORC genérico.

Os índices emergéticos que são apresentados na Fig. (3.5) entrando no volume de controle correspondem aos insumos básicos utilizados na fabricação dos componentes do ciclo ORC e operação da planta de energia, estando sumarizados na Tab. (3.1).

Os blocos contidos dentro do volume de controle da Fig. (3.5) representam o ciclo de vida da planta de geração de energia subdividido em fases, em relação ao tempo de vida útil de funcionamento do sistema. Primeiro têm-se a fase de construção, onde

são contabilizados todos os recursos necessários para a fabricação dos equipamentos do ciclo ORC (evaporador, condensador, aquecedor, turbina e bomba, assim como o fluido de trabalho).

Já a segunda fase, a fase de operação, contabiliza todos os insumos necessários para o funcionamento do ciclo ORC (calor residual e mão de obra). Neste trabalho o insumo referente a mão de obra não será abordado devido à dificuldade de medir o trabalho humano em termos emergéticos, tendo em vista que diversas formas biológicas e energéticas podem ser consideradas somado ao fato de não haver ainda um valor médio de referência em virtude do trabalho humano variar entre pessoas e entre regiões.

E por último, na fase de desativação, considera-se que a unidade de geração de energia chegou ao fim de sua vida útil e é contabilizada a energia consumida no transporte de seus equipamentos para sua destinação final (descarte ou reciclagem). Neste estudo, será considerada a energia relacionada à queima do diesel para transportar os equipamentos até seu local de descarte.

Tabela 3.1 – Índices emergéticos básicos.

Índices	Símbolo	Exemplo
Recursos ambientais renováveis	R	Ar, água, sol
Recursos ambientais não renováveis	N	Calor residual
Insumos adquiridos renováveis	F_r	Energia hidráulica
Insumos adquiridos não renováveis	F_n	Carvão, diesel
Produto	P	Eletricidade

3.3.2 – Contabilização da energia

Feita a análise do ciclo de vida, é possível então realizar a contabilização dos índices emergéticos. Esta contabilização consiste em quantificar os itens contidos na Tab. (3.1) em relação a todos os componentes do ciclo e aplicar as expressões contidas na Tab. (3.2) para assim, obter os índices emergéticos derivados, sendo o *EIS* o índice derivado responsável por classificar o sistema em sustentável a curto, médio e longo prazo. Cada um dos índices derivados contidos na Tab. (3.2) traz um parecer na visão emergética para o sistema, sendo explicados no trabalho de Liang *et al.* (2016) e apresentado a seguir.

O rendimento Y é a soma de todos os insumos utilizados na fabricação dos equipamentos apresentados na Tab. (3.1) e representa a energia total necessária para a obtenção do produto final (energia elétrica para este trabalho). Já transformada do produto T_r é a relação Y/P que fornece um elemento em termos de sua energia unitária (sej). O índice EYR é caracterizado por medir a capacidade do sistema em explorar recursos locais e torná-los disponíveis para investir em recursos externos, enquanto o índice ELR contabiliza a carga ambiental do sistema. O índice EIR afere o nível de utilização de energia que é investido no sistema, e por fim o índice EIS que é responsável por medir a sustentabilidade do sistema. Se $EIS < 1$, o sistema é dito como sustentável em um curto período; Se $1 < EIS < 5$, o sistema é dito sustentável em um médio período e por fim; Se $EIS > 5$, o sistema é classificado como sustentável por um longo período.

Tabela 3.2 – Índices emergéticos derivados.

Índices	Símbolo	Expressão
Rendimento	Y	$Y = R + N + F_r + F_n$
Transformada do produto	T_r	Y/P
Taxa de rendimento emergético	EYR	$Y/(F_r + F_n)$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$(F_n + N)/(F_r + R)$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$(F_r + F_n)/(R + N)$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	EYR/ELR

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 – FLUXOGRAMA

De acordo com a modelagem física apresentada no Cap. (3), um fluxograma contendo os procedimentos para obtenção dos dados emergéticos para um ciclo termodinâmico é apresentado na Fig. (4.1), englobando desde a concepção do ciclo a ser utilizado até a obtenção dos índices emergéticos derivados.

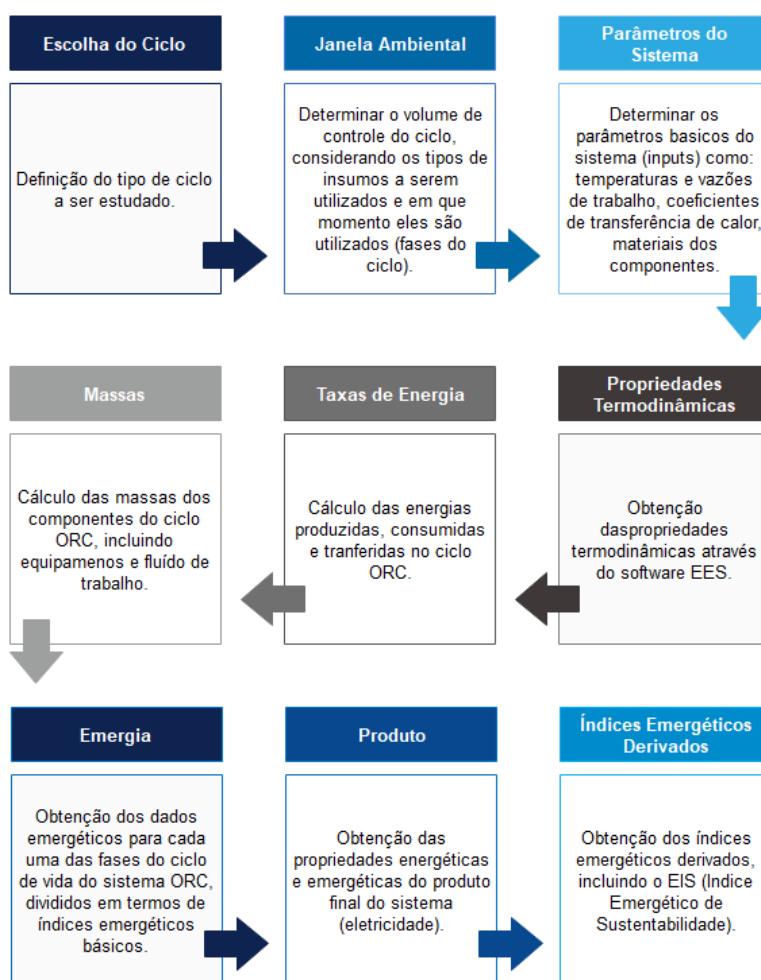


Figura 4.1 – Fluxograma contendo o procedimento para obtenção dos resultados emergéticos para um ciclo termodinâmico.

4.2 – VALIDAÇÃO DO MÉTODO

O método de análise emergética para um ciclo orgânico de Rankine foi explorado primeiramente por Zhang *et al.* (2018). Neste estudo os autores consideraram um ciclo ORC reversível básico contendo apenas o R134a como fluido de trabalho e seus equipamentos, sendo eles um evaporador, um condensador, uma turbina e uma bomba. Para a realização dos cálculos termodinâmicos e determinação das massas dos equipamentos do ciclo ORC alguns parâmetros termodinâmicos foram definidos pelos autores, conforme apresentado na Tab. (4.1).

A fim de validar a metodologia apresentada pelos autores, os procedimentos de cálculos termodinâmicos e emergéticos foram realizados novamente com o intuito de verificar a aplicação física e matemática das hipóteses, assim como dos dados encontrados pelos autores para então comparar com os dados obtidos nesta validação. Tal procedimento pode ser verificado nos tópicos a seguir.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados de acordo com Zhang *et al.* (2018).

Parâmetros	Valor	Unidade
Temperatura da água do calor residual (T_{cr})	120	(°C)
Vazão mássica da água do calor residual ($\dot{m}_{\text{água},q}$)	1	(kg/s)
Diferença de temperatura no evaporador (ΔT_{eva})	10	(°C)
Diferença de temperatura no condensador (ΔT_{con})	5	(°C)
Tempo de operação anual do sistema (n)	7.000	(horas)
Tempo de operação do sistema (y)	20	(anos)
Coeficiente global de transferência de calor no evaporador (U_{eva})	50	W/(m².K)
Coeficiente global de transferência de calor no condensador (U_{con})	70	W/(m².K)
Massa específica do aço ($\rho_{aço}$)*	7.930	(kg/m³)
Espessura das placas dos trocadores de calor ($\delta_{(eva/con/af)}$)	0,002	(m)
Massa de aço requerida na turbina (α_t)	31,22	(kg/kW)
Massa de aço requerida na bomba (α_b)	14	(kg/kW)
Perda de massa do fluido de trabalho no sistema (L_{ft})	10	(%)
Massa de fluido de trabalho consumida na turbina (β)	5,57	(kg/kW)

* Este aço corresponde ao "aço inoxidável (304) = 7930 kg/m³" de acordo com Berton (2007).

4.2.1 – Análise termodinâmica

Para modelar o ciclo termodinâmico, Zhang *et al.* (2018) utilizaram a primeira lei da termodinâmica aplicada a um ciclo equivalente com o da Fig. (3.1.a), conforme procedimento para obtenção do equacionamento apresentado no Cap. (3), Seção (3.1.1).

Primeiramente foram obtidas as propriedades termodinâmicas com auxílio do EES. A rotina para esses cálculos pode ser visualizada no Anexo (A) e os dados termodinâmicos obtidos por essa rotina estão apresentados na Tab. (4.2).

De acordo com a Fig. (3.1.a) foram admitidas as temperaturas de 96,33°C, 30°C e 32,27°C respectivamente para os pontos (1), (3) e (4). O fluido de transferência de calor utilizado nos trocadores de calor foi ar a pressão de uma atmosfera (considerando a mesma pressão para a entrada e saída do ar) escoando em fluxo cruzado no evaporador a 120°C no estado (5) e saindo a temperatura de 80°C no estado (6), no condensador entrando a 20°C no estado (7) e saindo a 25°C no estado (8). A vazão mássica conforme apresentado na Tab. (4.1) para os estados de (5) e (6) foi de $\dot{m}_{ar,q} = 1 \text{ kg/s}$.

Para o cálculo das vazões mássicas para os estados (1) a (4) foi utilizada a Eq. (3.4) e para os estados (8) e (9) foi utilizada a Eq. (3.10). Ambos os cálculos podem ser visualizados abaixo.

A vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador pode ser calculada pela Eq. (3.4):

$$0 = \dot{m} \cdot (270,20 - 96,84) + 1 \cdot (353,90 - 394,30) \Rightarrow \dot{m} = 0,233 \text{ kg/s}$$

A vazão mássica de ar no condensador pode ser calculada pela Eq. (3.10):

$$0 = 0,233 \cdot (93,58 - 244,70) + \dot{m}_{ar,f} \cdot (298,40 - 293,50) \Rightarrow \dot{m}_{ar,f} = 7,187 \text{ kg/s}$$

Tabela 4.2 – Propriedades termodinâmicas obtidas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang *et al.* (2018).

Estado ORC	T (°C)	p (bar) obtida	p (bar) referência	$\dot{m}$ (kg/s) obtida	$\dot{m}$ (kg/s) referência	h (kJ/kg) obtida	h (kJ/kg) referência
1	96,33	36,92	36,92	0,233	0,2331	270,20	270,20
2	30	7,706	7,71	0,233	0,2331	244,70	248,50
3	30	7,706	7,71	0,233	0,2331	93,58	93,58
4	32,27	36,92	36,92	0,233	0,2331	96,84	96,84
5	120	1,013	1,01	1,000	1,000	394,30	394,30
6	80	1,013	1,01	1,000	1,000	353,90	353,90
7	20	1,013	1,01	7,187	7,190	293,40	293,50
8	25	1.013	1.01	7,187	7,190	298,40	298,60

Após a obtenção das propriedades termodinâmicas, foi possível calcular a taxa de energia fornecida pelo evaporador e a taxa de energia removida pelo condensador, bem como a potência produzida pela turbina e a potência consumida pela bomba, conforme equacionamento apresentado no Cap. (3).

Da Eq. (3.2) para o evaporador, Eq. (3.6) para a turbina, Eq. (3.8) para o condensador e Eq. (3.12) para a bomba obtém-se:

$$\dot{Q}_{eva} = 0,233 \cdot (270,20 - 96,84,66) = 40,40 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_t = 0,233 \cdot (270,20 - 244,70) = 5,94 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{con} = 0,233 \cdot (244,70 - 93,58) = 35,22 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_b = 0,233 \cdot (96,84 - 93,58) = 0,76 \text{ kW}$$

Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foi possível calcular a massa de cada um dos componentes do ciclo. Conforme equacionamento apresentado no Cap. (3), a partir dos dados da Tab. (4.1), das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (4.2) e das taxas de calor

transferidas no evaporador e no condensador, pode-se calcular a área do evaporador e do condensador a partir da Eq. (3.59), obtendo-se:

$$A_{eva} = \frac{40,40 \cdot 10^3}{70 \cdot 34,309} = 16,822 \text{ m}^2$$

$$A_{con} = \frac{35,22 \cdot 10^3}{50 \cdot 7,214} = 97,643 \text{ m}^2$$

As massas do evaporador e do condensador podem ser calculadas a partir da Eq. (3.58), conforme apresentado a seguir:

$$m_{eva} = 7.930 \cdot 16,822 \cdot 0,002 = 266,797 \text{ kg}$$

$$m_{con} = 7.930 \cdot 97,643 \cdot 0,002 = 1.548,618 \text{ kg}$$

A partir dos dados da Tab. (4.1), das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (4.2) e da potência produzida/consumida pela turbina/bomba, pode-se calcular a massa da turbina e da bomba a partir da Eq. (3.60), obtendo-se:

$$m_t = 31,22 \cdot 5,94 = 185,447 \text{ kg}$$

$$m_b = 14 \cdot 0,76 = 10,64 \text{ kg}$$

A partir dos dados da Tab. (4.1), das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (4.2) e da potência produzida na turbina, pode-se calcular a massa do fluido de trabalho a partir da Eq. (3.61), obtendo-se:

$$m_{ft} = 0,10 \cdot (5,57 \cdot 5,94) + (5,57 \cdot 5,94) = 36,40 \text{ kg}$$

Os resultados obtidos anteriormente foram compilados e podem visualizados nas tabelas Tab. (4.3) e Tab. (4.4):

Tabela 4.3 – Área, massa e taxa de energia obtidas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à de Zhang *et al.* (2018).

Equipamento	Área (m ²)	Área (m ²)	Massa (kg)	Massa (kg)
	obtida	referência	obtida	referência
Evaporador	16,822	16,800	266,797	266,790
Turbina	-	-	185,447	157,700
Condensador	97,643	100,100	1.548,618	1.587,430
Bomba	-	-	10,640	10,650
R134a	-	-	36,400	30,940
Total	114,465	116,900	2.047,902	2.053,510

Tabela 4.4 – Taxa de energia obtida para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à de Zhang *et al.* (2018).

Equipamento	Taxa de energia (kW)	Taxa de energia (kW)
	obtida	referência
Evaporador	40,40	40,40
Turbina	5,94	5,05
Condensador	35,22	36,10
Bomba	0,76	0,76
R134a	-	-
Total	5,18¹	4,29¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Comparando os dados apresentados nas tabelas Tab. (4.3) e Tab. (4.4), foi possível verificar uma pequena diferença entre os dados obtidos durante a validação do método e os dados apresentados por Zhang *et al.* (2018) de modo que, essas diferenças ocorreram principalmente nos dados relacionados ao condensador, turbina e consequentemente o fluido de trabalho que é dimensionado em função da demanda de potência da turbina.

A fim de averiguar essas diferenças, através da Tab. (4.2) pode-se notar uma diferença entre a entalpia calculada e fornecida pelos autores no ponto (2), respectivamente 244,7 kJ/kg e 248,5 kJ/kg, que de acordo com a Fig. (3.1.a) corresponde as propriedades avaliadas na saída da turbina. Esta diferença esta associada

possivelmente a versões diferentes do EES utilizado entre este estudo e dos autores, onde pode ter ocorrido a utilização de tabelas termodinâmicas com algumas aproximações diferentes. A diferença obtida entre a área, massa e taxa de energia, atreladas ao valor diferente obtido para entalpia no ponto (2) da Fig. (3.1.a) pode ser verificada na Tab. (4.5).

Os cálculos foram realizados com a mudança da entalpia do ponto (2) de 244,7 kJ/kg para 248,5 kJ/kg e foi verificado que as áreas, massas e taxa de energia obtiveram o mesmo valor apresentado no trabalho de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 4.5 – Diferença percentual entre área, massa e taxa de energia obtida para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang *et al.* (2018) devido a mudança de entalpia no ponto (2) da Fig. (3.1.a).

Equipamento	Propriedade avaliada	Diferença	Resultado
Condensador	Taxa de energia (kW)	2,45%	Diminuição
Condensador	Área (m ²)	2,45%	Diminuição
Condensador	Massa (kg)	2,44%	Diminuição
Turbina	Taxa de energia (kW)	-17,67%	Acréscimo
Turbina	Massa (kg)	-17,59%	Acréscimo
Ciclo	Potência líquida (kW)	-20,81%	Acréscimo
R134a	Massa (kg)	-17,65%	Acréscimo

4.2.2 – Análise Emergética

Na Seção (3.3.1) do Cap. (3) foi apresentado o modelo da janela ambiental, na qual os componentes utilizados na montagem e operação do ciclo ORC foram classificados em três diferentes etapas (construção, operação e desativação), conforme sua ordem de utilização no ciclo. Dessa forma é possível quantificar a emergia em cada um desses estágios separadamente para cada tipo de item utilizado, a fim de determinar a emergia total utilizada no sistema e sua respectiva classificação em termos de índices emergéticos derivados.

Para gerar a validação emergética, será realizada a classificação dos insumos utilizados no sistema conforme a Tab. (3.1) e depois, as suas respectivas contabilizações segundo sua unidade de acordo com a definição da transformada T_r e emergia.

4.2.2.1 – Fase de Construção

A primeira etapa de cálculos energéticos, de acordo com a Fig. (3.5), é a fase de construção. Nela devem ser contabilizados todos os insumos necessários para a fabricação dos componentes do ciclo, sendo eles um evaporador, um condensador, uma turbina, uma bomba e o fluido de trabalho conforme a Tab. (3.1). Como a energia mede o histórico energético de um determinado elemento/produto/serviço, é necessário conhecer a carga contida na origem de cada equipamento utilizado no ciclo ORC.

Foi considerado que os equipamentos utilizados no ciclo foram construídos todos com o mesmo aço, descrito na Tab. (4.1) com $\rho_{aço} = 7.930 \text{ kg/m}^3$. Conforme Zhang *et al.* (2018) este aço é composto pelos elementos apresentados na primeira coluna da Tab. (4.6). Nesta tabela é possível verificar que cada um dos componentes utilizados na fabricação do aço estão separados em termos de índices energéticos básicos, de acordo com a Tab. (3.1), que sinaliza em qual classe de insumos o componente pertence. Sabendo a quantidade de aço necessária para montagem do ciclo ORC reversível, conforme cálculo apresentado na Seção (4.2.1) é preciso distribuir a massa correspondente para cada um dos elementos que compõe o aço. Zhang *et al.* (2018) aplicou essa proporção em termos de massa dos elementos que compõe o aço para uma massa total de 2.022,57 kg, neste estudo foi realizada a proporção entre estes mesmos valores utilizados por Zhang *et al.* (2018) e a massa total obtida para cada componente de conforme apresentado na Tab. (4.3).

Após a contabilização das massas e demais termos unitários na Tab. (4.6) e a partir de valores da transformada T_r fornecidos por Zhang *et al.* (2018) para cada um dos elementos indicados na tabela, foi possível aplicar a definição da transformada T_r ao multiplicar o termo unitário pela sua respectiva transformada T_r , obtendo assim a respectiva energia em termos de solaremjoule (sej).

Na fase de construção também está incluso o fluido de trabalho. O procedimento é praticamente o mesmo utilizado para o aço na Tab. (4.6), substituindo os elementos que compõe o aço pelos elementos que constituem o fluido de trabalho, no caso o R134a. Os elementos constituintes do R134a foram obtidos do trabalho de McCulloch e Lindley (2003) e as transformadas T_r foram obtidas do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

Conforme resultados para ciclo ORC reversível apresentado na Tab. (4.3), a massa total de aço utilizada neste ciclo corresponde a soma das massas do evaporador, turbina, condensador e bomba, sendo igual a 2.011,502 kg. Com a massa total de aço, é possível calcular a proporcionalidade dos valores referente a coluna “Componentes” da Tab. (4.6) para 2.011,502 kg de aço e através dos dados da transformada (T_r), apresentados por Zhang *et al.* (2018), calcular a energia do elemento aço para os componentes na fase de construção. Esses dados para o aço estão na Tab. (4.6).

Tabela 4.6 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ⁽¹⁾	$2,34 \cdot 10^{-1}$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$1,21 \cdot 10^{13}$
Calcário (t) ⁽¹⁾		$5,08 \cdot 10^{-2}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$5,08 \cdot 10^{13}$
Mina de Alumínio (t) ⁽¹⁾		$1,73 \cdot 10^{-2}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,73 \cdot 10^{13}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ⁽¹⁾		$2,54 \cdot 10^{-1}$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,08 \cdot 10^{15}$
Ilmenita (t) ⁽¹⁾		$5,90 \cdot 10^{-3}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$1,10 \cdot 10^{14}$
Minério de ferro (t) ⁽¹⁾		$4,23 \cdot 10^{-1}$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$3,61 \cdot 10^{14}$
Água doce (t) ⁽¹⁾			$5,12 \cdot 10^0$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,40 \cdot 10^{12}$
Elettricidade Hidráulica (t) ⁽¹⁾			$2,73 \cdot 10^9$			$8,00 \cdot 10^4$	$2,18 \cdot 10^{14}$
Semi coque (t) ⁽¹⁾				$5,02 \cdot 10^9$		$1,06 \cdot 10^4$	$5,32 \cdot 10^{13}$
Coque (t) ⁽¹⁾				$1,14 \cdot 10^{10}$		$1,06 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^{14}$
Sílica (t) ⁽¹⁾				$4,05 \cdot 10^{-1}$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$4,86 \cdot 10^{13}$
Fluorita (t) ⁽¹⁾				$1,68 \cdot 10^{-4}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$4,55 \cdot 10^{11}$
Ciminito (t) ⁽¹⁾				$1,04 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,04 \cdot 10^{14}$
Aço de corte (t) ⁽¹⁾				$1,58 \cdot 10^{-2}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,70 \cdot 10^{13}$
Escória de corte (t) ⁽¹⁾				$5,36 \cdot 10^{-3}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$2,27 \cdot 10^{13}$
Escala de óxido (t) ⁽¹⁾				$9,39 \cdot 10^{-3}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$8,03 \cdot 10^{12}$
Alumínio (t) ⁽¹⁾				$1,22 \cdot 10^{-2}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$4,38 \cdot 10^{13}$
Ferro em pó (t) ⁽¹⁾				$5,23 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{14}$
Bentonita (t) ⁽¹⁾				$6,04 \cdot 10^{-3}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,04 \cdot 10^{12}$
Carvão (t) ⁽¹⁾				$5,40 \cdot 10^9$		$3,98 \cdot 10^4$	$2,15 \cdot 10^{14}$
Lingote de ferro (t) ⁽¹⁾				$5,23 \cdot 10^{-3}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{12}$
Ferrosilício (t) ⁽¹⁾				$1,54 \cdot 10^{-4}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$7,52 \cdot 10^{10}$
Ferro-liga (t) ⁽¹⁾				$5,03 \cdot 10^{-4}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,30 \cdot 10^{11}$
Casa de máquinas (\$) ⁽¹⁾				$3,63 \cdot 10^1$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,89 \cdot 10^{14}$
Serviço e Trabalho (\$) ⁽¹⁾				$4,59 \cdot 10^1$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$2,39 \cdot 10^{15}$
Aço (t)					$2,01 \cdot 10^0$	$2,77 \cdot 10^{15}$	$5,57 \cdot 10^{15}$

(1) Corresponde a quantidade de massa necessária para produzir o total de massa de aço utilizado no ciclo ORC. Esses dados são provenientes do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

Já no caso do fluido de trabalho R134a, conforme a Tab. (4.3), constitui-se em uma massa de 36,40 kg. Sendo assim, aplicando a mesma metodologia para o cálculo da Tab. (4.6), utilizando o princípio da proporcionalidade e dados da transformada (T_r) apresentados por Zhang *et al.* (2018), foi possível obter a Tab. (4.7) para o R134a na fase de construção. A transformada (T_r) do fluido de trabalho foi obtida através da Tab. (3.2). Somam-se todos os termos de energia dos componentes do fluido (rendimento Y [sej]) e divide-se este valor pelo produto (massa total do fluido R134a [kg]), obtendo-se então a transformada (T_r) em [sej/J].

Tabela 4.7 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ⁽¹⁾	$9,10 \cdot 10^{-1}$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$6,04 \cdot 10^{11}$
Fluorspar (t) ⁽¹⁾		$1,42 \cdot 10^{-2}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$3,86 \cdot 10^{13}$
Óleo Cru (J) ⁽¹⁾		$5,46 \cdot 10^{-3}$				$5,40 \cdot 10^4$	$2,95 \cdot 10^2$
Gás Natural (J) ⁽¹⁾		$6,19 \cdot 10^{-3}$				$4,80 \cdot 10^4$	$2,97 \cdot 10^2$
Calcário (t) ⁽¹⁾		$7,64 \cdot 10^{-3}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$7,64 \cdot 10^{12}$
Enxofre (t) ⁽¹⁾		$5,82 \cdot 10^{-3}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$5,01 \cdot 10^{12}$
Cloreto de Sódio (t) ⁽¹⁾		$1,13 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,13 \cdot 10^{14}$
Nitrogênio (t) ⁽¹⁾			$1,82 \cdot 10^{-2}$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$7,37 \cdot 10^{14}$
Elettricidade do Carvão (J) ⁽¹⁾				$1,57 \cdot 10^8$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^{13}$
Calor (J) ⁽¹⁾				$1,02 \cdot 10^9$		$6,07 \cdot 10^4$	$6,19 \cdot 10^{13}$
R134a (t) ⁽¹⁾					$3,64 \cdot 10^1$	$2,70 \cdot 10^{16}$	$9,82 \cdot 10^{17}$

(1) Corresponde a quantidade de massa necessária para produzir o total de massa de fluido de trabalho utilizado no ciclo ORC. Esses dados são provenientes do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

4.2.2.2 – Fase de Operação

A segunda etapa de cálculos emergéticos de acordo com a Fig. (3.5) é a fase de operação. Nesta fase devem ser contabilizados todos os insumos necessários para manter o sistema operante durante seu ciclo de vida. Os autores consideraram a absorção de calor liberado e o calor residual como insumos para o funcionamento do ciclo ORC, através do aquecimento do fluido de trabalho no evaporador.

Utilizando o mesmo procedimento apresentado na Seção (4.2.2.1), é necessário obter os valores dos componentes unitários que integram esta fase da janela ambiental para, através das respectivas transformadas (T_r), calcular a emergência dos componentes.

A Fig. (3.5) indica que nesta fase o ciclo ORC é composto por um recurso renovável (absorção do calor liberado) e um não renovável (calor residual). Seguindo o mesmo procedimento de Zhang *et al.* (2018) e considerando os dados da Tab. (4.1) onde o ciclo de vida do sistema é de 20 anos operando 7.000 horas por ano, têm-se os seguintes procedimentos para obtenção destes dois insumos:

A absorção do calor liberado corresponde a energia liberada pelo condensador do ciclo ORC ($E_{l/cond}$) e é calculada como:

$$E_{l/cond} = \dot{Q}_{cond} \cdot n \cdot y = (35,22 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 1,77 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Já no caso do calor residual, é considerado o calor gerado pelo evaporador durante todo o ciclo de vida do sistema de geração de energia. O cálculo do calor residual é dado por:

$$C_r = \dot{Q}_{eva} \cdot n \cdot y = (40,40 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 2,04 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Com esses dados é possível construir uma tabela semelhante a Tab. (4.6), juntamente com os dados da transformada T_r fornecidos por Zhang *et al.* (2018) e a emergência para a fase de operação. Esses dados compilados podem ser vistos na Tab.(4.8).

Tabela 4.8 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente a fase de operação para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,77 \cdot 10^{13}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^{16}$
Calor residual (J) ¹		$2,04 \cdot 10^{13}$				$4,46 \cdot 10^4$	$9,08 \cdot 10^{17}$

(1) Dados provenientes do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

4.2.2.3 – Fase de Desativação

A terceira etapa de cálculos emergéticos de acordo com a Fig. (3.5) é a fase de desativação. Nesta fase devem ser contabilizados todos os insumos necessários para transportar os equipamentos do ciclo até sua destinação final. Para contabilizar a energia gasta neste processo e conseqüentemente a energia atrelada a ele, será considerada a energia consumida no transporte desses equipamentos em relação a queima de combustível utilizado por um meio de transporte.

Em seus estudos, os autores consideraram que a destinação dos equipamentos se daria a uma distância de 187,62 km do local de operação do sistema. Sendo assim, é preciso obter os valores dos componentes unitários que integram esta fase da janela ambiental para depois, através das respectivas transformadas T_r , calcular a energia dos componentes.

O autores consideraram o transporte realizado por caminhões a diesel e a média do consumo de diesel (C_{diesel}) foi adotada sendo igual a 2.423 [MJ/(kt.km)]. A energia liberada pela queima do diesel foi chamada de “Diesel para transporte (D_{trans})”, e seu calculo é dado pela seguinte expressão, de acordo com Zhang *et al.* (2018):

$$D_{trans} = d \cdot C_{diesel} \cdot (m_{ciclo} + m_{ft}) = 186,72 \cdot 2.423 \cdot (2.011,502 + 36,40) = 9,27 \cdot 10^8 \text{ J}$$

Com este resultado, foi possível elaborar uma tabela semelhante a Tab. (4.6), com a transformada T_r fornecida por Zhang *et al.* (2018) e a energia da fase de desativação. Esses resultados podem ser vistos na Tab.(4.9).

Tabela 4.9 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente a fase de desativação para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para transporte (J) ¹					$9,27 \cdot 10^{10}$	$6,60 \cdot 10^4$	$6,12 \cdot 10^{13}$

(1) Dados provenientes do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

4.2.2.4 – Produto Final

O produto final de acordo com a Fig. (3.5) corresponde a produção de eletricidade a partir da utilização de calor residual, sendo então necessário quantificar toda a energia produzida durante o ciclo de vida do sistema assim como a transformada deste produto.

Seguindo o mesmo procedimento utilizado nas seções anteriores pelos autores, é preciso obter o valor do componente unitário que integra o produto na janela ambiental para depois, através da respectiva transformada T_r , calcular a energia do produto final. De acordo com a Tab. (4.1) foi considerado que o sistema opera 7.000 horas por ano num ciclo de vida de 20 anos. O cálculo da energia produzida é realizado da seguinte maneira:

$$E_{\text{ciclo}} = \dot{W}_{\text{líquido}} \cdot n \cdot y = (5,18 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 2,61 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Como a eletricidade corresponde ao produto do processo, sua transformada está atrelada a todos os insumos utilizados até então, de modo que o cálculo da transformada se faz necessário. Ao utilizar a transformada da eletricidade provinda de outros processos, o resultado estaria vinculado aos recursos que foram utilizados nas etapas de obtenção desta eletricidade, e não ao do ciclo estudado e apresentado neste trabalho.

A partir disto, o cálculo da transformada T_r do produto (eletricidade) pode ser obtido através da equação contida na Tab. (3.2) onde, somam-se todos os termos de energia dos componentes utilizados nas três fases até se obter o produto (rendimento Y [sej]) e divide-se este valor pelo produto (energia total produzida durante ciclo de vida do sistema [J]), obtendo a transformada T_r em [sej/J] conforme mostrado abaixo:

$$T_r = \frac{Y}{P} = \frac{9,32 \cdot 10^{17}}{2,61 \cdot 10^{12}} = 3,57 \cdot 10^5 \text{ sej/J}$$

Os dados obtidos em termos de energia e transformada para o produto final podem ser visualizados na Tab. (4.10).

Tabela 4.10 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível referente ao produto do ciclo para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$2,61 \cdot 10^{12}$	$3,57 \cdot 10^5$	

Com os dados obtidos nesta Seção (4.2.2) de validação, foi possível gerar uma única tabela, Tab. (4.11), a fim de se verificar os dados emergéticos para todas as fases do ciclo. Esta tabela contempla os dados das tabelas Tab. (4.6) à Tab. (4.10).

De posse de todos os valores de emergia para cada um dos componentes dos equipamentos e fases do ciclo de vida do sistema ORC, foi possível calcular os índices emergéticos derivados apresentados na Tab. (3.2). Esses índices fornecem resultados emergéticos acerca do ciclo ORC que serão discutidos nos Capítulos (5) e (6). Como os índices emergéticos derivados referem-se ao montante total de emergia do ciclo ORC, a coluna de emergia apresentada na Tab. (4.11) foi somada em termos de índices emergéticos básicos, podendo ser visualizada na Tab. (4.12).

Tabela 4.12 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC reversível para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

R	N	F_r	F_n
$1,71 \cdot 10^{16}$	$9,10 \cdot 10^{17}$	$9,59 \cdot 10^{14}$	$3,86 \cdot 10^{15}$

Com os dados da Tab. (4.12) e das relações matemáticas mostradas na Tab. (3.2) pode-se calcular os índices emergéticos derivados, conforme apresentado a seguir:

- Rendimento Y :

$$Y = R + N + F_r + F_n = 1,71 \cdot 10^{16} + 9,10 \cdot 10^{17} + 9,59 \cdot 10^{14} + 3,86 \cdot 10^{15} = 9,32 \cdot 10^{17} \text{ sej}$$

- Taxa de rendimento emergético EYR :

$$EYR = \frac{Y}{F_r + F_n} = \frac{9,32 \cdot 10^{17}}{9,59 \cdot 10^{14} + 3,86 \cdot 10^{15}} = 1,93 \cdot 10^2$$

- Taxa de carregamento ambiental ELR :

$$ELR = \frac{F_n + N}{F_r + R} = \frac{3,86 \cdot 10^{15} + 9,10 \cdot 10^{17}}{9,59 \cdot 10^{14} + 1,71 \cdot 10^{16}} = 5,06 \cdot 10^1$$

- Taxa de investimento ambiental EIR :

$$EIR = \frac{F_r + F_n}{R + N} = \frac{9,59 \cdot 10^{14} + 3,86 \cdot 10^{15}}{1,71 \cdot 10^{16} + 9,10 \cdot 10^{17}} = 5,20 \cdot 10^{-3}$$

- Índice emergético de sustentabilidade EIS :

$$EIS = \frac{EYR}{ELR} = \frac{1,93 \cdot 10^2}{5,06 \cdot 10^1} = 3,82$$

Os índices emergéticos derivados calculados nesta seção podem ser visualizados e comparados com os índices obtidos por Zhang *et al.* (2018) na Tab. (4.13).

Tabela 4.13 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang *et al.* (2018).

Índices	Símbolo	Resultado obtido	Resultado referência
Rendimento	Y	$9,32 \cdot 10^{17}$	$9,43 \cdot 10^{17}$
Transformada	T_r	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$4,31 \cdot 10^{-5}$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,93 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,06 \cdot 10^1$	$4,98 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,20 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,82	3,97

Tabela 4.11 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível para validação do método de Zhang *et al.* (2018).

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t)	$2,34 \cdot 10^{-1}$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$1,21 \cdot 10^{13}$
Calcário (t)		$5,08 \cdot 10^{-2}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$5,08 \cdot 10^{13}$
Mina de Alumínio (t)		$1,73 \cdot 10^{-2}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,73 \cdot 10^{13}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t)		$2,54 \cdot 10^{-1}$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,08 \cdot 10^{15}$
Ilmenita (t)		$5,90 \cdot 10^{-3}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$1,10 \cdot 10^{14}$
Minério de ferro (t)		$4,23 \cdot 10^{-1}$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$3,61 \cdot 10^{14}$
Água doce (t)			$5,12 \cdot 10^0$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,40 \cdot 10^{12}$
Elettricidade Hidráulica (t)			$2,73 \cdot 10^9$			$8,00 \cdot 10^4$	$2,18 \cdot 10^{14}$
Semi coque (t)				$5,02 \cdot 10^9$		$1,06 \cdot 10^4$	$5,32 \cdot 10^{13}$
Coque (t)				$1,14 \cdot 10^{10}$		$1,06 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^{14}$
Sílica (t)				$4,05 \cdot 10^{-1}$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$4,86 \cdot 10^{13}$
Fluorita (t)				$1,68 \cdot 10^{-4}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$4,55 \cdot 10^{11}$
Cimirito (t)				$1,04 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,04 \cdot 10^{14}$
Aço de corte (t)				$1,58 \cdot 10^{-2}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,70 \cdot 10^{13}$
Escória de corte (t)				$5,36 \cdot 10^{-3}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$2,27 \cdot 10^{13}$
Escala de óxido (t)				$9,39 \cdot 10^{-3}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$8,03 \cdot 10^{12}$
Alumínio (t)				$1,22 \cdot 10^{-2}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$4,38 \cdot 10^{13}$
Ferro em pó (t)				$5,23 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{14}$
Bentonita (t)				$6,04 \cdot 10^{-3}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,04 \cdot 10^{12}$
Carvão (t)				$5,40 \cdot 10^9$		$3,98 \cdot 10^4$	$2,15 \cdot 10^{14}$
Lingote de ferro (t)				$5,23 \cdot 10^{-3}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{12}$
Ferrosilício (t)				$1,54 \cdot 10^{-4}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$7,52 \cdot 10^{10}$
Ferro-liga (t)				$5,03 \cdot 10^{-4}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,30 \cdot 10^{11}$
Casa de máquinas (\$)				$3,63 \cdot 10^1$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,89 \cdot 10^{14}$
Serviço e Trabalho (\$)				$4,59 \cdot 10^1$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$2,39 \cdot 10^{15}$
Aço (t)					$2,01 \cdot 10^0$	$2,77 \cdot 10^{15}$	$5,57 \cdot 10^{15}$
Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Água (t)	$9,10 \cdot 10^{-1}$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$6,04 \cdot 10^{11}$
Fluorspar (t)		$1,42 \cdot 10^{-2}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$3,86 \cdot 10^{13}$
Óleo Cru (J)		$5,46 \cdot 10^{-3}$				$5,40 \cdot 10^4$	$2,95 \cdot 10^2$
Gás Natural (J)		$6,19 \cdot 10^{-3}$				$4,80 \cdot 10^4$	$2,97 \cdot 10^2$
Calcário (t)		$7,64 \cdot 10^{-3}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$7,64 \cdot 10^{12}$
Enxofre (t)		$5,82 \cdot 10^{-3}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$5,01 \cdot 10^{12}$
Cloreto de Sódio (t)		$1,13 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,13 \cdot 10^{14}$
Nitrogênio (t)			$1,82 \cdot 10^{-2}$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$7,37 \cdot 10^{14}$
Elettricidade do				$1,57 \cdot 10^8$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^{13}$
Carvão (J)				$1,02 \cdot 10^9$		$6,07 \cdot 10^4$	$6,19 \cdot 10^{13}$
R134a (t)					$3,64 \cdot 10^1$	$2,70 \cdot 10^{16}$	$9,82 \cdot 10^{17}$
Fase de Operação							
Absorção do Calor Liberado (J)	$1,77 \cdot 10^{13}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^{16}$
Calor Residual (J)		$2,04 \cdot 10^{13}$				$4,46 \cdot 10^4$	$9,08 \cdot 10^{17}$
Fase de Desativação							
Diesel para Transporte (J)					$9,27 \cdot 10^{10}$	$6,60 \cdot 10^4$	$6,12 \cdot 10^{13}$
PRODUTO							
ELETRICIDADE (J)					$2,61 \cdot 10^{12}$	$3,57 \cdot 10^5$	

4.2.3 – Comparação de resultados

De acordo com os dados apresentados na Tab. (4.13), pode-se verificar que houve certa diferença entre os dados calculados nesta seção de validação de método, entretanto a ordem de grandeza dos resultados se manteve. Essa diferença pode ser visualizada em termos percentuais através da Tab. (4.14).

No final da Seção (4.2.1) também houve uma constatação de diferenças de resultados entre os dados dos autores Zhang *et al.* (2018) e os dados apresentados nesta validação. Essa diferença foi conferida a uma diferença de entalpia encontrada para o ponto (2) da Fig. (3.1.a). Para o caso dos dados emergéticos também foi realizada uma simulação considerando o dado de Zhang *et al.* (2018) para a entalpia no ponto (2) de modo que, os resultados emergéticos obtidos foram iguais aos dos autores, mantendo assim a mesma constatação da Seção (4.2.1) validando então o método utilizado pelos autores.

Tabela 4.14 – Diferença percentual entre os índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a em comparação à Zhang *et al.* (2018).

Índices	Diferença	Resultado
Rendimento	0%	-
Transformada	17%	Diminuição
Taxa de rendimento emergético	2%	Diminuição
Taxa de carregamento ambiental	-2%	Acréscimo
Taxa de investimento ambiental	-2%	Acréscimo
Índice emergético de sustentabilidade	4%	Diminuição

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia apresentada no Cap. (4) para os diferentes ciclos ORC e seus fluidos de trabalho. Os materiais que compõe os fluidos orgânicos de trabalho R134a e NH₃ foram obtidos respectivamente dos trabalhos de McCulloch e Lindley (2002) e Bicer *et al.* (2016).

5.1 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

5.1.1 – Ciclo ORC Reversível

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível apresentadas na Seção (3.1.1) do Cap. (3), foram obtidas com o auxílio do software EES. As rotinas para os cálculos dos fluídos R134a e NH₃ podem ser visualizadas respectivamente nos Anexos (B) e (C) e os dados termodinâmicos obtidos por essas rotinas estão apresentados respectivamente nas tabelas Tab. (5.1) e Tab. (5.2) para os fluídos R134a e NH₃.

Atribuiu-se as temperaturas de 90°C e 30°C respectivamente para os estados (1) e (3) da Fig. (3.1.a). Esses valores foram obtidos do trabalho de Ding *et al.* (2018), onde os autores apresentaram um ciclo ORC reversível para diferentes fluidos de trabalho e a partir dos ciclos apresentados, foi calculada a média aritmética das temperaturas nos estados (1) e (3) sendo então utilizada neste estudo. O intuito desse procedimento foi obter uma temperatura média para comparação com outros fluidos de trabalho de tal forma que, essas temperaturas sejam iguais para todos os ciclos apresentados neste trabalho. Para os estados (1) e (3) da Fig. (3.1.a) considerou-se vapor saturado na saída do evaporador e líquido saturado na saída do condensador.

O fluido de transferência de calor utilizado nos trocadores de calor foi água a pressão de uma atmosfera (considerando a mesma pressão para a entrada e saída da

água). As temperaturas foram definidas de acordo com Zhang *et al.* (2018), escoando em fluxo cruzado no evaporador a 120°C no estado (5) da Fig. (3.1.a) e saindo a temperatura de 80°C no estado (6) da Fig. (3.1.a), enquanto no condensador entrando a 20°C no estado (7) da Fig. (3.1.a) e saindo a 25°C no estado (8) da Fig. (3.1.a).

A vazão mássica dos estados (5) e (6) da Fig. (3.1.a) foi obtida da Tab. (4.1), sendo $\dot{m}_{\text{água},q} = 1 \text{ kg/s}$. A vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador ($\dot{m}$) para os estados (1) a (4) da Fig. (3.1.a) pode ser calculada pela Eq. (3.4), enquanto a vazão mássica de água no condensador ($\dot{m}_{\text{água},f}$) para os estados (8) e (9) da Fig. (3.1.a) pode ser calculada pela Eq. (3.10). Ambas as vazões serão calculadas a seguir para o fluido R134a com o auxílio da Tab. (5.1). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃, utilizando a Tab. (5.2).

Para o fluido R134a, com as propriedades termodinâmicas provindas da Tab. (5.1):

$$0 = \dot{m} \cdot (277,10 - 95,66) + 1 \cdot (335,00 - 2.716,00) \Rightarrow \dot{m} = 13,123 \text{ kg/s}$$

$$0 = 13,123 \cdot (93,58 - 251,90) + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (104,80 - 83,93) \Rightarrow \dot{m}_{\text{água},f} = 99,55 \text{ kg/s}$$

Tabela 5.1 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	32,47	90	13,123	277,10
2	7,706	30	13,123	251,90
3	7,706	30	13,123	93,58
4	32,47	31,45	13,123	95,66
5	1,013	120	1,000	2.716,00
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	99,55	83,93
8	1,013	25	99,55	104,80

Tabela 5.2 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível com fluido NH₃.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	51,16	90	2,144	1.459,00
2	11,67	30	2,144	1.292,00
3	11,67	30	2,144	341,80
4	51,16	31,09	2,144	348,40
5	1,013	120	1,000	2.716
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	97,610	83,93
8	1.013	25	97,610	104,80

5.1.2 – Ciclo ORC Irreversível

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível apresentadas na Seção (3.1.2) do Cap. (3) foram obtidas com o auxílio do software EES. As rotinas para os cálculos dos fluídos R134a e NH₃ podem ser visualizadas respectivamente nos Anexos (D) e (E) e os dados termodinâmicos obtidos por essas rotinas estão apresentados respectivamente nas tabelas Tab. (5.3) e Tab. (5.4) para os fluídos R134a e NH₃.

Atribuiu-se as temperaturas 90°C e 30°C respectivamente para os estados (1) e (3) da Fig. (3.1.a), onde no estado (1) considerou-se vapor saturado na saída do evaporador e no estado (3) líquido saturado na saída do condensador.

O fluido de transferência de calor utilizado nos trocadores de calor foi água a pressão de uma atmosfera (considerando a mesma pressão para a entrada e saída da água). As temperaturas foram definidas de acordo com Zhang *et al.* (2018), escoando em fluxo cruzado no evaporador a 120°C no estado (5) da Fig. (3.1.a) e saindo a temperatura de 80 °C no estado (6) da Fig. (3.1.a), enquanto no condensador entrando a 20°C no estado (7) da Fig. (3.1.a) e saindo a 25°C no estado (8) da Fig. (3.1.a).

A vazão mássica dos estados (5) e (6) da Fig. (3.1.a) foi obtida da Tab. (4.1), sendo $\dot{m}_{\text{água},q} = 1$ kg/s. A vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador ($\dot{m}$) para os estados de (1) a (4) da Fig. (3.1.a) pode ser calculada pela Eq. (3.4), enquanto a vazão mássica de água no condensador ($\dot{m}_{\text{água},f}$) para os estados (8) e (9) da Fig. (3.1.a) pode ser calculada pela Eq. (3.10). Ambas as vazões serão calculadas a seguir para o

fluido R134a com o auxílio da Tab. (5.3). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 utilizando a Tab. (5.4).

Para o fluido R134a, com as propriedades termodinâmicas provindas da Tab. (5.3):

$$0 = \dot{m} \cdot (277,10 - 96,02) + 1 \cdot (335,00 - 2.716,00) \Rightarrow \dot{m} = 13,149 \text{ kg/s}$$

$$0 = 13,149 \cdot (93,58 - 255,70) + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (104,80 - 83,93) \Rightarrow \dot{m}_{\text{água},f} = 102,143 \text{ kg/s}$$

Tabela 5.3 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	32,47	90	13,149	277,10
2s	7,706	30	13,149	251,90
2	7,706	30	13,149	255,70
3	7,706	30	13,149	93,58
4s	32,47	31,45	13,149	95,65
4	32,47	31,70	13,149	96,02
5	1,013	120	1,000	2.716,00
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	102,143	83,93
8	1.013	25	102,143	104,80

Tabela 5.4 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	51,16	90	2,146	1459,00
2s	11,67	30	2,146	1292,00
2	11,67	30	2,146	1317,00
3	11,67	30	2,146	341,80
4s	51,16	31,09	2,146	348,40
4	51,16	31,33	2,146	349,60
5	1,013	120	1,000	2.716,00
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	100,287	83,93
8	1.013	25	100,287	104,80

5.1.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado apresentadas na Seção (3.1.3) do Cap. (3) foram obtidas com o auxílio do software EES. As rotinas para os cálculos dos fluídos R134a e NH₃ podem ser visualizadas respectivamente nos Anexos (F) e (G) e os dados termodinâmicos obtidos por essas rotinas estão apresentados respectivamente nas tabelas Tab. (5.5) e Tab. (5.6) para os fluídos R134a e NH₃.

Atribui-se as temperaturas 90°C, 30°C e 45°C respectivamente para os estados (1), (4) e (6) na Fig. (3.3.a), onde no estado (1) considerou-se vapor saturado na saída do evaporador, no estado (4) líquido saturado na saída do condensador e no estado (6) líquido saturado na saída do aquecedor de alimentação fechado.

O fluido de transferência de calor utilizado nos trocadores de calor foi água a pressão de uma atmosfera (considerando a mesma pressão para a entrada e saída da água). As temperaturas foram definidas de acordo com Zhang *et al.* (2018), escoando em fluxo cruzado no evaporador a 120°C no estado (11) da Fig. (3.3.a) e saindo a temperatura de 80 °C no estado (12) da Fig. (3.3.a), enquanto no condensador entrando a 20°C no estado (9) da Fig. (3.3.a) e saindo a 25°C no estado (10) da Fig. (3.3.a).

A vazão mássica dos estados (11) e (12) da Fig. (3.3.a) foi obtida da Tab. (4.1), sendo $\dot{m}_{\text{água},q} = 1 \text{ kg/s}$. A vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador ($\dot{m}$) para os estados (1) e (6) da Fig. (3.3.a) pode ser calculada pela Eq. (3.27), enquanto a vazão mássica de água no condensador ($\dot{m}_{\text{água},f}$) para os estados (9) e (10) da Fig. (3.3.a) pode ser calculada pela Eq. (3.35). Os estados (2) e (3) correspondem a fração mássica extraída na turbina de primeiro estágio, na qual a vazão mássica ($\dot{m}_2$) do estado (2) é obtida pela Eq. (3.42) e a vazão mássica ($\dot{m}_3$) do estado (3) corresponde a vazão mássica total subtraída da vazão mássica extraída na turbina de primeiro estágio, ou seja, $\dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2$. Essas vazões serão calculadas a seguir para o fluido R134a com o auxílio da Tab. (5.5). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ utilizando a Tab. (5.6).

Para o fluido R134a, com as propriedades termodinâmicas providas da Tab. (5.5), segue o cálculo para a vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador, a vazão

mássica ($\dot{m}_2$) do estado (2), a vazão mássica ($\dot{m}_3$) do estado (3) e a vazão mássica de água no condensador respectivamente:

$$0 = \dot{m} \cdot (277,10 - 117,70) + 1 \cdot (335,00 - 2.716,00) \Rightarrow \dot{m} = 14,937 \text{ kg/s}$$

$$0 = 14,937 \cdot (117,70 - 95,65) + \dot{m}_2 \cdot (123,50 - 261,90) \Rightarrow \dot{m}_2 = 2,380 \text{ kg/s}$$

$$\text{Dessa forma, como } \dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2, \dot{m}_3 = 12,557 \text{ kg/s}$$

$$0 = 14,937 \cdot 93,58 - 2,380 \cdot 123,50 - 12,557 \cdot 251,90 + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (104,80 - 83,93)$$

$$\therefore \dot{m}_{\text{água},f} = 98,670 \text{ kg/s}$$

Tabela 5.5 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	32,47	90	14,937	277,10
2	13,19	50	2,380	261,90
3	7,706	30	12,557	251,90
4	7,706	30	14,937	93,58
5	32,47	31,45	14,937	95,65
6	32,47	45	14,937	117,70
7	13,19	50	2,380	123,50
8	7,706	30	2,380	123,50
9	1,013	20	98,670	83,93
10	1,013	25	98,670	104,80
11	1,013	120	1,000	2.716,00
12	1,013	80	1,000	335,00

Tabela 5.6 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	51,16	90	2,294	1.459,00
2	20,33	50	0,183	1.353,00
3	11,67	30	2,111	1.292,00
4	11,67	30	2,294	341,80
5	51,16	31,09	2,294	348,40
6	51,16	45	2,294	421,30
7	20,33	50	0,183	440,60
8	11,67	30	0,183	440,60
9	1,013	20	96,988	83,93
10	1,013	25	96,988	104,80
11	1,013	120	1,000	2.716,00
12	1,013	80	1,000	335,00

5.1.4– Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado apresentadas na Seção (3.1.4) do Cap. (3) foram obtidas com o auxílio do software EES. As rotinas para os cálculos dos fluídos R134a e NH_3 podem ser visualizadas respectivamente nos Anexos (H) e (I) e os dados termodinâmicos obtidos por essas rotinas estão apresentados respectivamente nas tabelas Tab. (5.7) e Tab. (5.8) para os fluídos R134a e NH_3 .

Atribui-se as temperaturas 90°C, 30°C e 45°C respectivamente para os estados (1), (4) e (6) na Fig. (3.3.a), onde no estado (1) considerou-se vapor saturado na saída do evaporador, no estado (4) líquido saturado na saída do condensador e no estado (6) líquido saturado na saída do aquecedor de alimentação fechado.

O fluido de transferência de calor utilizado nos trocadores de calor foi água a pressão de uma atmosfera (considerando a mesma pressão para a entrada e saída da água). As temperaturas foram definidas de acordo com Zhang *et al.* (2018), escoando em fluxo cruzado no evaporador a 120°C no estado (11) da Fig. (3.3.a) e saindo a temperatura de 80°C no estado (12) da Fig. (3.3.a), enquanto no condensador entrando a 20°C no estado (9) da Fig. (3.3.a) e saindo a 25°C no estado (10) da Fig. (3.3.a).

A vazão mássica dos estados (11) e (12) da Fig. (3.3.a) foi obtida da Tab. (4.1), sendo $\dot{m}_{\text{água},q} = 1 \text{ kg/s}$. A vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador ($\dot{m}$) para os estados (1) e (6) da Fig. (3.3.a) pode ser calculada pela Eq. (3.27), enquanto a vazão mássica de água no condensador ($\dot{m}_{\text{água},f}$) para os estados (9) e (10) da Fig. (3.3.a) pode ser calculada pela Eq. (3.35). Os estados (2) e (3) correspondem a fração mássica extraída na turbina de primeiro estágio, na qual a vazão mássica ($\dot{m}_2$) do estado (2) é obtida pela Eq. (3.42) e a vazão mássica ($\dot{m}_3$) do estado (3) corresponde a vazão mássica total subtraída da vazão mássica extraída na turbina de primeiro estágio, ou seja, $\dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2$. Essas vazões serão calculadas a seguir para o fluido R134a com o auxílio da Tab. (5.7). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 utilizando a Tab. (5.8).

Para o fluido R134a, com as propriedades termodinâmicas providas da Tab. (5.7), segue o cálculo para a vazão mássica do fluido de trabalho no evaporador, a vazão mássica ($\dot{m}_2$) do estado (2), a vazão mássica ($\dot{m}_3$) do estado (3) e a vazão mássica de água no condensador respectivamente:

$$0 = \dot{m} \cdot (277,10 - 117,70) + 1 \cdot (335,00 - 2.716,00) \Rightarrow \dot{m} = 14,937 \text{ kg/s}$$

$$0 = 14,937 \cdot (117,70 - 96,02) + \dot{m}_2 \cdot (123,50 - 264,20) \Rightarrow \dot{m}_2 = 2,302 \text{ kg/s}$$

$$\text{Dessa forma, como } \dot{m}_3 = \dot{m} - \dot{m}_2, \dot{m}_3 = 12,635 \text{ kg/s}$$

$$0 = 14,937 \cdot 93,58 - 2,302 \cdot 123,50 - 12,635 \cdot 253,70 + \dot{m}_{\text{água},f} \cdot (104,80 - 83,93)$$

$$\therefore \dot{m}_{\text{água},f} = 100,240 \text{ kg/s}$$

Tabela 5.7 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	32,47	90	14,937	277,10
2s	13,19	50	2,302	261,90
2	13,19	50	2,302	264,20
3s	7,706	30	12,635	251,90
3	7,706	30	12,635	253,70
4	7,706	30	14,937	93,58
5s	32,47	31,45	14,937	95,65
5	32,47	31,7	14,937	96,02
6	32,47	45	2,302	117,70
7	13,19	50	2,302	123,50
8	7,706	30	2,302	123,50
9	1,013	20	100,240	83,93
10	1,013	25	100,240	104,80
11	1,013	120	1,000	2.716,00
12	1,013	80	1,000	335,00

Tabela 5.8 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH₃.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	51,16	90	2,294	1.459,00
2s	20,33	50	0,177	1.353,00
2	20,33	50	0,177	1.369,00
3s	11,67	30	2,177	1.292,00
3	11,67	30	2,117	1.303,00
4	11,67	30	2,294	341,8,00
5s	51,16	31,09	2,294	348,4,00
5	51,16	31,33	2,294	349,60
6	51,16	45	2,294	421,30
7	20,33	50	0,117	440,60
8	11,67	30	0,117	440,60
9	1,013	20	98,354	83,93
10	1,013	25	98,354	104,80
11	1,013	120	1,000	2.716,00
12	1,013	80	1,000	335,00

5.2 – MASSA DOS COMPONENTES DO CICLO

A partir da obtenção das propriedades termodinâmicas apresentadas na Seção (5.1) para os diferentes ciclos apresentados neste estudo, foi possível calcular conforme equacionamento apresentado na Seção (3.1) as seguintes taxas de energia: Fornecida no evaporador, removida no condensador, produzida na(s) turbina(s), consumida na bomba e trocada no aquecedor de alimentação fechado.

Baseado nas taxas de energia e com o auxílio do equacionamento apresentado na Seção (3.2), foi possível obter a massa dos equipamentos que compõe o ciclo ORC bem como do fluido de trabalho. A obtenção desses dados será apresentada a seguir:

5.2.1 – Ciclo ORC reversível

Através das propriedades termodinâmicas obtidas na Seção (5.1.1) e o equacionamento apresentado na Seção (3.1.1) obteve-se as taxas de energia para o evaporador, condensador, turbina e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.1) para o fluido R134a e Tab. (5.2) para o fluido NH_3 .

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.9) e Tab. (5.10) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3 .

Tabela 5.9 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	882,723	13.999,99	2.381,04
Turbina	-	10.324,45	330,70
Condensador	5.760,022	91.353,95	2.077,64
Bomba	-	382,20	27,30
R134a	-	2.026,20	-
Total	6.642,745	118.086,79	303,40¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.10 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 .

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	879,199	13.944,10	2.381,00
Turbina	-	11.177,67	358,03
Condensador	5.648,098	89.578,83	2.037,12
Bomba	-	198,10	14,15
NH_3	-	2.193,64	-
Total	6.527,297	117.092,34	343,88¹

(1) Potência líquida do ciclo

5.2.2 – Ciclo ORC irreversível

Através das propriedades termodinâmicas obtidas na Seção (5.1.2) e o equacionamento apresentado na Seção (3.1.2) obteve-se as taxas de energia para o evaporador, condensador, turbina e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3) para o fluido R134a e Tab. (5.4) para o fluido NH_3 .

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.11) e Tab. (5.12) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3

Tabela 5.11 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	885,1714	14.038,86	2.381,02
Turbina	-	8.785,00	281,39
Condensador	5.909,953	93.731,85	2.131,72
Bomba	-	449,12	32,08
R134a	-	1.724,08	-
Total	6.795,127	118.728,91	249,31¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.12 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .

Equipamento	Área (m ²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	881,5392	13.981,21	2.381,00
Turbina	-	9.514,64	304,76
Condensador	5.802,9707	92.035,12	2.092,98
Bomba	-	2.34,37	16,74
NH_3	-	1.867,27	-
Total	6.684,509	117.632,31	228,02¹

(1) Potência líquida do ciclo

5.2.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

Através das propriedades termodinâmicas obtidas na Seção (5.1.3) e o equacionamento apresentado na Seção (3.1.3) obteve-se as taxas de energia para o evaporador, condensador, turbinas, bomba e aquecedor de alimentação fechado assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.5) para o fluido R134a e Tab. (5.6) para o fluido NH_3 .

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.13) e Tab. (5.14) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3 .

Tabela 5.13 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Equipamento	Área (m ²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	11.008,82	352,62
Condensador	5.709,590	90.554,09	2059,30
Bomba	-	432,88	30,92
Aquecedor fechado	568,305	9.013,32	293,68
R134a	-	2.160,51	-
Total	7.326,560	129.801,45	321,70²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.14 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	11.613,78	372,00
Condensador	5.612,123	89.008,28	2.024,15
Bomba	-	212,01	15,14
Aquecedor fechado	87,112	1.381,59	45,54
NH_3	-	2.279,23	-
Total	6.747,900	121.126,72	356,86²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo.

5.2.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

Através das propriedades termodinâmicas obtidas na Seção (5.1.4) e o equacionamento apresentado na Seção (3.1.4) obteve-se as taxas de energia para o evaporador, condensador, turbinas, bomba e aquecedor de alimentação fechado assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.7) para o fluido R134a e Tab. (5.8) para o fluido NH_3 .

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.15) e Tab. (5.16) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3 .

Tabela 5.15 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	10.157,73	325,36
Condensador	5.800,303	91.992,80	2.092,02
Bomba	-	509,27	36,38
Aquecedor fechado	562,424	8.920,04	288,26
R134a	-	1.993,48	-
Total	7.411,39	130.205,15	288,98²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.16 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH₃.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	10.809,81	346,25
Condensador	5.691,157	90.261,75	2.052,65
Bomba	-	250,56	17,90
Aquecedor fechado	86,275	1.368,32	44,76
NH ₃	-	2.121,45	-
Total	6.826,097	121.193,16	328,35²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo.

5.3 – DADOS EMERGÉTICOS

Na Seção (3.3.1) do Cap. (3) foi apresentado o modelo da janela ambiental, na qual os componentes utilizados na montagem e operação do ciclo ORC foram classificados em três diferentes etapas (construção, operação e desativação), conforme sua ordem de utilização no ciclo. Dessa forma foi possível quantificar a emergia em cada um desses estágios separadamente para cada tipo de item utilizado. A seguir os insumos utilizados nas três fases foram classificados conforme a Tab. (3.1) e depois foram contabilizados e classificados segundo sua unidade de acordo com a definição da transformada T_r e emergia, de acordo com a Tab. (3.2)

5.3.1 – Ciclo ORC reversível

5.3.1.1 – Fase de construção

De acordo com a Fig. (3.5) a primeira fase a ser analisada é a fase de construção. Esta fase envolve diretamente os seguintes equipamentos: evaporador, turbina, condensador, bomba e fluido de trabalho. É necessário contabilizar todos os insumos utilizados na fabricação de cada um desses itens conforme a Tab. (3.1) pois, como a energia mede o histórico energético de um determinado elemento/produto/serviço, é necessário conhecer a carga emergética contida na origem de cada equipamento utilizado no ciclo ORC.

Neste estudo foi considerado que os equipamentos utilizados no ciclo foram construídos todos com o mesmo aço, de acordo com a Tab. (4.1). Conforme Zhang *et al.* (2018) este aço é composto pelos elementos apresentados na primeira coluna da Tab. (5.17). Nesta tabela, é possível verificar que cada um dos componentes utilizados na fabricação do aço estão separados em termos de índices emergéticos básicos, de acordo com a Tab. (3.1), que sinaliza em qual classe de insumos o componente pertence. Sabendo a quantidade de aço (massa) necessária para montagem do ciclo ORC reversível, conforme cálculo de massas apresentado na Seção (5.2.1) e explícito na Tab. (5.9) para o fluido R134a, é preciso distribuir a massa correspondente para cada um desses elementos presentes na primeira coluna. Zhang *et al.* (2018) aplicou essa proporção em termos de massa para uma massa total de aço de 2.022,57 kg. Neste estudo foi realizada a proporção entre as massas obtidas na Tab. (5.9) e a massa obtida por Zhang *et al.* (2018).

Após a contabilização das massas e demais termos unitários presentes na primeira coluna da Tab. (5.17) e a partir dos valores da transformada T_r de cada um dos componentes indicados nesta mesma primeira coluna fornecidos por Zhang *et al.* (2018), foi possível aplicar a definição da transformada ao multiplicar o termo unitário pela sua respectiva transformada T_r , obtendo assim a respectiva energia em termos de solaremjoule (sej). Neste caso, a Tab. (5.17) contém os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos assim como suas respectivas transformadas e energia para o ciclo ORC reversível utilizando R134a como fluido de trabalho.

A partir dos dados da última coluna da Tab. (5.17) contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação aço em termos de energia, a massa total de aço utilizado nesta fase do ciclo provinda da Tab. (5.9) e a equação da transformada do produto presente na Tab. (3.2), têm-se o cálculo da (T_r) para o aço:

$$T_r = \frac{Y}{P} = \frac{3,18 \cdot 10^{17}}{1,16 \cdot 10^2} = 2,77 \cdot 10^{15} \text{ sej/t}$$

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 , onde através da Tab. (5.10) obtém-se a Tab. (5.18).

Tabela 5.17 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível com fluido R134a referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,35 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$6,96 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,93 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,93 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,98 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$9,98 \cdot 10^{14}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,46 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,20 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,40 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,33 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,44 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,09 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,96 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,96 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,57 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,26 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,90 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,07 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,60 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$6,99 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,34 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,80 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,70 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,63 \cdot 10^{13}$
Cimirito (t) ¹				$6,03 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,03 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,12 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,87 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,31 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,42 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,63 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,06 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,53 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,02 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,58 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,48 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,48 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,12 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,02 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,58 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,89 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,34 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,90 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,48 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,09 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,09 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,65 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,38 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,16 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.18 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,33 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$6,89 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,90 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,90 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,88 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$9,88 \cdot 10^{14}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,45 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,14 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,37 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,27 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,41 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,06 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,93 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,94 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,56 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,87 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,04 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,53 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$6,92 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,31 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,77 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,60 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,60 \cdot 10^{13}$
Cimiritito (t) ¹				$5,96 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$5,96 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,03 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,83 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,06 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,30 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,36 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,59 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$6,99 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,50 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$2,99 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,55 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,45 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,45 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,08 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,23 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$2,99 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,55 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,81 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,30 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,87 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,46 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,07 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,08 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,62 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,36 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,15 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Na fase de construção também está inclusa a fabricação do fluido de trabalho. O procedimento é praticamente o mesmo utilizado para obtenção das tabelas Tab. (5.17) e Tab. (5.18) para os componentes fabricados com aço, mas neste caso contabiliza-se todos os insumos utilizados na fabricação do fluido de trabalho com suas respectivas proporções. As transformadas T_r para os elementos que compõe o R134a e a NH_3 foram obtidas de Zhang *et al.* (2018).

Já a transformada do produto (T_r) do fluido de trabalho é obtida através da Tab. (3.2). Somam-se todos os termos de emergia dos componentes do fluido (Rendimento Y [sej]) e divide-se este valor pelo produto (massa total do fluido de trabalho [kg]), obtendo-se então a transformada (T_r) em [sej/J].

A partir dos dados da última coluna da Tab. (5.19), contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a em termos de emergência, a massa total de fluido de trabalho provinda da Tab. (5.9) e a equação da transformada do produto presente na Tab. (3.2), têm-se o cálculo da (T_r) para o R134a:

$$T_r = \frac{Y}{P} = \frac{5,47 \cdot 10^{16}}{2,02620} = 2,70 \cdot 10^{16} \text{ sej/t}$$

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.10), obtém-se a Tab. (5.20).

Tabela 5.19 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	5,07·10 ¹					6,64·10 ¹¹	3,36·10 ¹³
Fluorspar (t) ¹		7,90·10 ⁻¹				2,72·10 ¹⁵	2,15·10 ¹⁵
Óleo Cru (J) ¹		3,04·10 ⁻¹				5,40·10 ⁴	1,64·10 ⁴
Gás Natural (J) ¹		3,44·10 ⁻¹				4,80·10 ⁴	1,65·10 ⁴
Calcário (t) ¹		4,25·10 ⁻¹				1,00·10 ¹⁵	4,25·10 ¹⁴
Enxofre (t) ¹		3,24·10 ⁻¹				8,60·10 ¹⁴	2,79·10 ¹⁴
Cloreto de Sódio (t) ¹		6,28·10 ⁰				1,00·10 ¹⁵	6,28·10 ¹⁵
Nitrogênio (t) ¹			1,01·10 ⁰			4,05·10 ¹⁶	4,10·10 ¹⁶
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				8,75·10 ⁹		1,17·10 ⁵	1,02·10 ¹⁵
Calor (J) ¹				5,67·10 ¹⁰		6,07·10 ⁴	3,44·10 ¹⁵
R134a (t) ¹					2,03·10 ⁰	2,70·10 ¹⁶	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.20 – Índices emergéticos do NH_3 para o ciclo ORC reversível referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$3,49 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,32 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,81 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,31 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do Carvão (J) ¹				$8,69 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$2,19 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.1.2 – Fase de operação

De acordo com a Fig. (3.5) a segunda fase a ser analisada é a fase de operação. Nesta fase são contabilizados os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante. Neste estudo, considerou-se o calor residual e a absorção de calor liberado como insumos para o funcionamento do ciclo ORC, aquecendo o fluido de trabalho no evaporador e resfriando no condensador respectivamente.

Utilizando o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1), é necessário obter os valores dos componentes unitários que integram esta fase da janela ambiental e através das respectivas transformadas (T_r), calcular a emergência dos componentes.

A Fig. (3.5) indica que o ciclo ORC é composto por um recurso renovável (absorção do calor liberado) e um não renovável (calor residual). A obtenção da transformada (T_r) correspondente a essas duas parcelas foi obtida do trabalho de Zhang *et al.* (2018).

A seguir será apresentado o cálculo para obtenção da absorção do calor liberado e do calor residual referente ao ciclo ORC reversível utilizando o fluido R134a, esses resultados podem ser visualizados na Tab. (5.21). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através da Tab. (5.10) obtém-se a Tab. (5.22).

A absorção do calor liberado corresponde a energia liberada pelo condensador do ciclo ORC, $E_{l/cond}$. De acordo com a Tab. (4.1) foi considerado que o ciclo opera 7.000 horas por ano, num ciclo de vida de 20 anos. A partir da taxa de energia do condensador apresentada na Tab. (5.9), a quantidade de energia liberada pelo condensador é calculada como:

$$E_{l/cond} = \dot{Q}_{cond} \cdot n \cdot y = (2.077,64 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 1,05 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Já no caso do calor residual, considera-se o calor gerado pelo evaporador durante todo o ciclo de vida do sistema de geração de energia. A partir da taxa de energia do evaporador apresentada na Tab. (5.9), o cálculo do calor residual é dado por:

$$C_r = \dot{Q}_{eva} \cdot n \cdot y = (2.381,04 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 1,20 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Tabela 5.21 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido R134a referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.22 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido NH₃ referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,03 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$8,89 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.1.3 – Fase de desativação

De acordo com a Fig. (3.5) a terceira fase a ser analisada é a fase de desativação. Nesta fase foi considerada a energia consumida em relação a queima de combustível (diesel) utilizado por um meio de transporte para descartar os equipamentos do ciclo ORC a uma distância de 200 km do local de operação do sistema

Sendo assim, é preciso obter os valores dos componentes unitários que integram esta fase da janela ambiental para depois, através das respectivas transformadas (T_r), calcular a emergia dos componentes. Para quantificar a energia consumida no transporte dos equipamentos do ciclo, utilizou-se uma expressão apresentada por Zhang *et al.* (2018) para o cálculo do componente “Diesel para transporte – (D_{trans})”. Os autores consideraram o transporte realizado por caminhões a diesel e a média do consumo de diesel (C_{diesel}) é 2.423 [MJ/(kt.km)], utilizaremos esta mesma premissa.

A seguir será apresentado o cálculo para obtenção do diesel consumido no transporte dos componentes referente ao ciclo ORC reversível utilizando o fluido R134a onde, através da Tab. (5.9) contendo a massa total do sistema, foi possível obter a Tab.

(5.23) contendo a energia consumida no transporte e sua respectiva transformada e emergia.

$$D_{trans} = d \cdot C_{diesel} \cdot (m_{ciclo} + m_{ft}) = 200 \cdot 2.423 \cdot (116.060,25 + 2.026,14) = 5,72 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.10) obtém-se a Tab. (5.24).

Tabela 5.23– Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido R134a referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,72 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,78 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.24 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$3,16 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$2,09 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.1.4 – Produto Final

De acordo com a Fig. (3.5) o ciclo passa por três fases até se obter o produto final, no caso a eletricidade. Os dados do produto também precisam ser contabilizados na análise emergética. Seguindo o mesmo procedimento utilizado na Seção (5.3.1), é preciso obter o valor do componente unitário que integra o produto na janela ambiental para depois, através da respectiva transformada do produto (T_r), calcular a emergia do produto final. Como já mencionado anteriormente o produto final do ciclo ORC é a eletricidade. Sendo assim, é preciso quantificar a energia produzida durante o ciclo de

vida do sistema ORC e calcular sua respectiva transformada (T_r), para então obter a energia do produto.

A seguir será apresentado o cálculo para obtenção do produto final (energia elétrica) referente ao ciclo ORC reversível utilizando o fluído R134a onde, através da Tab. (5.9) contendo a potência líquida do ciclo, foi possível obter a Tab. (5.25) contendo a energia produzida e sua respectiva transformada.

De acordo com a Tab. (4.1) foi considerado que o sistema opera 7.000 horas por ano num ciclo de vida de 20 anos e com a potência líquida do ciclo apresentada na Tab.(5.9), têm-se o calculo para obtenção da energia produzida:

$$E_{ciclo} = \dot{W}_{liquido} n_y = (303,40 \cdot 3.600 \cdot 1.000) \cdot 7.000 \cdot 20 = 1,53 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

A transformada (T_r) do produto (eletricidade) é obtida através da Tab. (3.2). Somam-se todos os termos de energia dos componentes utilizados nas três fases (Rendimento Y [sej]) e divide-se este valor pelo produto (energia total produzida durante o ciclo de vida do sistema [J]), obtendo a transformada do produto (T_r) em [sej/J].

A partir dos dados da última coluna das tabelas Tab. (5.17), Tab. (5.19), Tab.(5.21) e Tab. (5.23) contendo a relação de cada insumo utilizado nas três fases do sistema utilizando o R134a em termos de energia, da energia total produzida durante o ciclo de vida do sistema conforme equação apresentada anteriormente e a equação da transformada do produto presente na Tab. (3.2), têm-se o cálculo da transformada do produto (T_r) para a eletricidade:

$$T_r = \frac{Y}{P} = \frac{5,49 \cdot 10^{19}}{1,53 \cdot 10^{14}} = 3,59 \cdot 10^5 \text{ sej/J}$$

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH_3 onde, através da Tab. (5.10) para obtenção da potência útil do ciclo e das tabelas Tab. (5.18), Tab. (5.20), Tab. (5.22) e Tab. (5.24) contendo a relação de cada insumo utilizado nas três fases, obtém-se a Tab. (5.26).

Tabela 5.25 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,53.10^{14}$		$3,59.10^5$	

Tabela 5.26 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,73.10^{14}$		$3,17.10^5$	

5.3.1.5 – Índices Emergéticos derivados

De posse de todos os valores de emergia para cada um dos componentes das diferentes fases do ciclo de vida do sistema ORC reversível calculados no decorrer de toda a Seção (5.3.1), foi possível calcular os índices emergéticos derivados apresentados na Tab. (3.2). Esses índices emergéticos derivados fornecem algumas informações emergéticas acerca do ciclo ORC que serão discutidas na sequência.

Para realizar os cálculos dos índices emergéticos derivados é necessário realizar o somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia, ou seja, separar a coluna de emergia presente nas tabelas apresentadas desde a Seção (5.3.1.1) até a Seção (5.3.1.4) e somar todos os termos em relação a sua classificação, sendo: recursos renováveis (R), recursos não renováveis (N), insumos renováveis (F_r) e insumos não renováveis (F_n). A partir deste somatório é possível aplicar os cálculos apresentados na Tab. (3.2).

O somatório de índices emergéticos básicos pode ser visualizado abaixo, sendo que a Tab. (5.27) contém este somatório para o fluido R134a provindo das tabelas Tab.(5.17), Tab. (5.19), Tab. (5.21), Tab. (5.23) e Tab. (5.25). Já para o fluido NH_3 , o somatório está presente na Tab. (5.28) e provem das tabelas Tab. (5.18), Tab. (5.20), Tab. (5.22), Tab. (5.24) e Tab. (5.26).

Tabela 5.27 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível com o fluido R134a.

R	N	F_r	F_n
$1,01 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$5,38 \cdot 10^{16}$	$2,23 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.28 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível com o fluido NH_3 .

R	N	F_r	F_n
$9,89 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,58 \cdot 10^{16}$	$2,13 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.27) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.28) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. A seguir será apresentado o cálculo para obtenção dos índices emergéticos derivados referente ao ciclo ORC reversível utilizando o fluido R134a através dos dados da Tab. (5.27) e do equacionamento da Tab. (3.2). O resultado dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a pode ser visualizado na Tab. (5.29).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 resultando na Tab. (5.30).

- Rendimento Y :

$$Y = R + N + F_r + F_n = 1,01 \cdot 10^{18} + 5,36 \cdot 10^{19} + 5,38 \cdot 10^{16} + 2,23 \cdot 10^{17} = 5,49 \cdot 10^{19} \text{ sej}$$

- Transformada do produto T_r : Calculada anteriormente na Seção (5.3.1.4).

$$T_r = \frac{Y}{P} = \frac{5,49 \cdot 10^{19}}{1,53 \cdot 10^{14}} = 3,59 \cdot 10^5 \text{ sej/J}$$

- Taxa de rendimento emergético EYR :

$$EYR = \frac{Y}{F_r + F_n} = \frac{5,49 \cdot 10^{19}}{5,38 \cdot 10^{16} + 2,23 \cdot 10^{17}} = 1,98 \cdot 10^2$$

- Taxa de carregamento ambiental ELR :

$$ELR = \frac{F_n + N}{F_r + R} = \frac{2,23 \cdot 10^{17} + 5,36 \cdot 10^{19}}{5,38 \cdot 10^{16} + 1,01 \cdot 10^{18}} = 5,07 \cdot 10^1$$

- Taxa de investimento ambiental EIR :

$$EIR = \frac{F_r + F_n}{R + N} = \frac{5,38 \cdot 10^{16} + 2,23 \cdot 10^{17}}{1,01 \cdot 10^{18} + 5,36 \cdot 10^{19}} = 5,07 \cdot 10^{-3}$$

- Índice emergético de sustentabilidade EIS :

$$EIS = \frac{EYR}{ELR} = \frac{1,98 \cdot 10^2}{5,06 \cdot 10^1} = 3,91$$

Tabela 5.29 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido R134a.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,59 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,98 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,07 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,07 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,92

Pode-se verificar pela Tab. (5.29) que o fluido R134a obteve um índice emergético (EIS) entre o intervalo de 1 e 5, se apresentando como sustentável por um médio período. Já o fluido NH_3 , segundo a Tab. (5.30), apresentou um (EIS) igual a 3,67, mantendo-se em uma classificação entre 1 e 5 sendo então também sustentável em um médio período. Pelos (EIS) maior apresentado, o R134a se portou como uma melhor opção em relação ao NH_3 considerando a aplicação neste ciclo ORC reversível.

Tabela 5.30 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível com fluido NH_3 .

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,17 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,84 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,01 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,47 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,67

5.3.2 – Ciclo ORC irreversível

5.3.2.1 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1), mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.31) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos apresentada na Seção (5.2.2) e explícita na Tab. (5.11) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.12) obtém-se a Tab. (5.32).

Tabela 5.31 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,36 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,01 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,96 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 96 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,01 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,01 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,48 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,25 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,43 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,38 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,46 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,10 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,92 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,98 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,59 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,92 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,10 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,65 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,05 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,35 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,83 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,78 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,65 \cdot 10^{13}$
Cimirit (t) ¹				$6,07 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,07 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,20 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,90 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,12 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,32 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,46 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,67 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,12 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,55 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,04 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,60 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,51 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,51 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,14 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,04 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,60 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,97 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,38 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,93 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,50 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,11 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,10 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,67 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{17}$
Aço (t)¹					$1,17 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.32 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,35 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$ $6,94 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,92 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $2,92 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,96 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $9,96 \cdot 10^{14}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,46 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$ $6,19 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,39 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$ $6,31 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,43 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,08 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,95 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$ $1,96 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,57 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$ $1,25 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,89 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $3,06 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,58 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $6,98 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,33 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$ $2,80 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,67 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$ $2,62 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,01 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $6,01 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,10 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $3,86 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $1,31 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,40 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $4,62 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,04 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$ $2,52 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,01 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,57 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,47 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $3,47 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,11 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$ $1,24 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,01 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,57 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,87 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$ $4,33 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,90 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,48 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,09 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,09 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,64 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,38 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,16 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.33) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Seção (5.2.2) e explícita na Tab. (5.11) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.12) obtém-se a Tab. (5.34).

Tabela 5.33 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$4,31 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,86 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$6,72 \cdot 10^{-1}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$1,83 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$2,59 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$1,40 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$2,93 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$1,41 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$3,62 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,62 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$2,76 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,37 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$5,34 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$5,34 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$8,62 \cdot 10^1$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$4,39 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$7,45 \cdot 10^9$		$1,17 \cdot 10^5$	$8,71 \cdot 10^{14}$
Calor (J) ¹				$4,83 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$2,93 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$1,72 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.34 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$2,97 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,97 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,54 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$6,22 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$7,39 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$8,65 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$1,87 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.2.2 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.35) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.11).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através da Tab. (5.12) obtém-se a Tab. (5.36).

Tabela 5.35 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,07 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.36 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH₃ referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.2.3 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.37) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Seção (5.2.2) e explícita na Tab. (5.11).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.12) obtém-se a Tab. (5.38).

Tabela 5.37 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J)					$5,75 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,80 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.38 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de operação.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J)					$3,24 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$2,14 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.2.4 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.39) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.11). Para obtenção da transformada do produto (T_r) foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.31), Tab. (5.33), Tab. (5.35) e Tab. (5.37).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.12), Tab. (5.32), Tab. (5.34), Tab. (5.36) e Tab. (5.38), obtêm-se a Tab. (5.40).

Tabela 5.39 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,26 \cdot 10^{14}$		$4,37 \cdot 10^5$	

Tabela 5.40 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,45.10^{14}$	$3,78.10^5$	

5.3.2.5 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.41) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.31), Tab. (5.33), Tab. (5.35), Tab. (5.37) e Tab. (5.39).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.32), Tab. (5.34), Tab. (5.36), Tab. (5.38) e Tab. (5.40), obtêm-se a Tab. (5.42).

Tabela 5.41 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a.

R	N	F_r	F_n
$1,04 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$4,78 \cdot 10^{16}$	$2,24 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.42 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH_3 .

R	N	F_r	F_n
$1,02 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$7,05 \cdot 10^{16}$	$2,14 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.41) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.42) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a podem ser visualizados na Tab. (5.43) e para o fluido NH_3 na Tab. (5.44).

Tabela 5.43 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$4,37 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$2,02 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,97 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$4,97 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	4,07

Tabela 5.44 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 .

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,78 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,90 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,93 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,30 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,85

Pode-se verificar que o fluido R134a obteve um índice emergético (EIS) entre o intervalo de 1 e 5 se apresentando como sustentável por um médio período. Já o fluido NH_3 apresentou um (EIS) igual a 3,85 mantendo-se também em uma classificação entre 1 e 5 sendo então sustentável em um médio período. Deste modo, é possível verificar que foi obtido um valor maior de (EIS) para a aplicação nestes ciclos ORC irreversíveis em comparação aos ciclos reversíveis.

5.3.3 – Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

5.3.3.1 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi

possível obter a Tab. (5.45) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos apresentada na Seção (5.2.3) e explícita na Tab. (5.13) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.14) obtém-se a Tab. (5.46).

Tabela 5.45 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,48 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,65 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,22 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,22 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,10 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,10 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,61 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,82 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,74 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,96 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,68 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,29 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,25 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,16 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,73 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,38 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$3,19 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,38 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$7,26 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,69 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,57 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$3,08 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$1,07 \cdot 10^{-2}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,89 \cdot 10^{13}$
Cimiritito (t) ¹				$6,63 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,63 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$1,00 \cdot 10^0$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$4,25 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,40 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,44 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,96 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$5,09 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,76 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,78 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,32 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,84 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,83 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,83 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,43 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,36 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,32 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,84 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,78 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,77 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$3,19 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,73 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,30 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,20 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,92 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,52 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,28 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.46 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,38 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,13 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,00 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,00 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,02 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,02 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,50 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,35 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,48 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,48 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,50 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,14 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,03 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,01 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,61 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,29 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,97 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,15 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,76 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,16 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,39 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,87 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,93 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,69 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,17 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,17 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,34 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,96 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,17 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,34 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,55 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,74 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,23 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,59 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,09 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,64 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,57 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,57 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,19 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,64 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,11 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,44 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,97 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,54 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,14 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,12 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,71 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,41 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,19 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.47) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Seção (5.2.3) e explícita na Tab. (5.13) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.14) obtém-se a Tab. (5.48).

Tabela 5.47 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$5,40 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,59 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$8,43 \cdot 10^{-1}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$2,29 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$3,24 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$1,75 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$3,67 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$1,76 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$4,54 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$4,54 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$3,46 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,97 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$6,70 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,70 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,08 \cdot 10^0$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$4,38 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$9,33 \cdot 10^9$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^{15}$
Calor (J) ¹				$6,05 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$3,67 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$2,16 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.48 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$3,62 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,41 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,88 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,60 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$9,03 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,06 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$2,28 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.3.2 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.49) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.13).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através da Tab. (5.14) obtém-se a Tab. (5.50).

Tabela 5.49 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,04 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$9,99 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.50 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH₃ referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,02 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$9,82 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.3.3 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.51) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Seção (5.2.3) e explícita na Tab. (5.13).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.14) obtém-se a Tab. (5.52).

Tabela 5.51 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$6,29 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$4,15 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.52 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH₃ referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,87 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,87 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.3.4 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.53) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.13). Para obtenção da transformada do produto (T_r), foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.45), Tab. (5.47), Tab. (5.49) e Tab. (5.51).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.14), Tab. (5.46), Tab. (5.48), Tab. (5.50) e Tab. (5.52), obtêm-se a Tab. (5.54).

Tabela 5.53 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente ao produto do ciclo.

PRODUTO						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,62 \cdot 10^{14}$	$3,39 \cdot 10^5$

Tabela 5.54 – Índices emergéticos para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente ao produto do ciclo.

PRODUTO						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,80 \cdot 10^{14}$	$3,05 \cdot 10^5$

5.3.3.5 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.55) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.45), Tab. (5.47), Tab. (5.49), Tab. (5.51) e Tab. (5.53).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.46), Tab. (5.48), Tab. (5.50), Tab. (5.52) e Tab. (5.54), obtêm-se a Tab. (5.56).

Tabela 5.55 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

R	N	F_r	F_n
$1,00 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$5,78 \cdot 10^{16}$	$2,45 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.56 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

R	N	F_r	F_n
$9,83 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,91 \cdot 10^{16}$	$2,24 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.55) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.56) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a podem ser visualizados na Tab. (5.57) e para o fluido NH_3 na Tab. (5.58).

Tabela 5.57 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,39 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,81 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,09 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,54 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,56

Tabela 5.58 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,05 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,76 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,02 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,73 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,50

Pode-se verificar que os fluidos analisados obtiveram um índice emergético (EIS) entre o intervalo de 1 e 5, portanto se apresentaram como sustentável por um médio período. Entre eles, o R134a apresenta-se como uma melhor opção considerando

a aplicação neste ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado. Como era esperado, os índices emergéticos para o ciclo com aquecedor de alimentação fechado e turbinas de dois estágios se apresentaram inferiores aos dos ciclos básicos (ORC reversível e irreversível) isso pois, o ciclo regenerativo como um todo é maior em comparação ao ciclo sem o sistema regenerativo devido a presença de mais equipamentos, havendo a necessidade de mais insumos para sua fabricação e operação o que leva a um maior impacto ambiental, tornando-os menos sustentáveis.

5.3.4 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

5.3.4.1 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.59) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos apresentada na Seção (5.2.4) e explícita na Tab. (5.15) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.16) obtém-se a Tab. (5.60).

Tabela 5.59 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,49 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,69 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,24 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,24 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,10 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,10 \cdot 10^{15}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,62 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,85 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,76 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,99 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,69 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,30 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,26 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,17 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,74 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$3,20 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,39 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$7,29 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,73 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,58 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$3,10 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$1,07 \cdot 10^{-2}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,90 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,66 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,66 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$1,01 \cdot 10^0$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$4,27 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,42 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,45 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,98 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$5,12 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,80 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,79 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,33 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,85 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,85 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,85 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,44 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,33 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,85 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,83 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,79 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$3,21 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,74 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,31 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,20 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,93 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,52 \cdot 10^{17}$
Aço (t)¹					$1,28 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.60 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente a fase de construção.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,39 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,15 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,01 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,01 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,03 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,03 \cdot 10^{15}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,50 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,38 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,50 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,51 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,51 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,14 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,04 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,02 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,62 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,29 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,98 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,16 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,78 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,19 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,40 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,88 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,97 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,70 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,19 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,19 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,38 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,98 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,18 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,35 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,57 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,76 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,26 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,60 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,10 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,65 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,58 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,58 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,20 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,10 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,65 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,14 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,46 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,99 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,55 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,15 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,12 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,73 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,42 \cdot 10^{17}$
Aço (t)¹					$1,19 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.61) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Seção (5.2.4) e explícita na Tab. (5.15) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.16) obtém-se a Tab. (5.62).

Tabela 5.61 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$4,98 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,31 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$7,77 \cdot 10^{-1}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$2,11 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$2,99 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$1,61 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$3,39 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$4,19 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$4,19 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$3,19 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,74 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$6,18 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,18 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$9,97 \cdot 10^{-1}$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$4,04 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$8,61 \cdot 10^9$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^{15}$
Calor (J) ¹				$5,58 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$3,39 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$1,99 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.62 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$3,37 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,24 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,75 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,07 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$8,40 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$9,83 \cdot 10^{12}$
NH ₃ (t) ¹					$2,12 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.4.2 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.63) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.15).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH_3 onde, através da Tab. (5.16) obtém-se a Tab. (5.64).

Tabela 5.63 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.64 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH_3 referente a fase de operação.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,03 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$9,96 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$				$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.4.3 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.65) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e energia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Seção (5.2.4) e explícita na Tab. (5.15).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH_3 onde, através da Tab. (5.16) obtém-se a Tab. (5.66).

Tabela 5.65 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído R134a referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$6,31 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$4,16 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.66 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluído NH₃ referente a fase de operação.

Fase de Desativação								
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P		T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,89 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,88 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.3.4.4 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.67) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.15). Para obtenção da transformada do produto (T_r), foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.59), Tab. (5.61), Tab. (5.63) e Tab. (5.65).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.16), Tab. (5.60), Tab. (5.62), Tab. (5.64) e Tab. (5.66), obtêm-se a Tab. (5.68).

Tabela 5.67 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,46 \cdot 10^{14}$	$3,77 \cdot 10^5$	

Tabela 5.68 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 referente ao produto do ciclo.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,65 \cdot 10^{14}$	$3,32 \cdot 10^5$	

5.3.4.5 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.69) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.59), Tab. (5.61), Tab. (5.63), Tab. (5.65) e Tab. (5.67).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.60), Tab. (5.62), Tab. (5.64), Tab. (5.66) e Tab. (5.68), obtêm-se a Tab. (5.70).

Tabela 5.69 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

R	N	F_r	F_n
$1,02 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$5,45 \cdot 10^{16}$	$2,46 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.70 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

R	N	F_r	F_n
$9,97 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,38 \cdot 10^{16}$	$2,25 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.69) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.70) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a podem ser visualizados na Tab. (5.71) e para o fluido NH_3 na Tab. (5.72).

Tabela 5.71 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido R134a.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,77 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,83 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,03 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,49 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,64

Tabela 5.72 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado utilizando o fluido NH_3 .

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,32 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,72 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$1,78 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,65 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,57

Pode-se verificar que o fluido R134a obteve um índice emergético (EIS) entre o intervalo de 1 e 5 se apresentando portanto como sustentável por um médio período. Já

o fluido NH_3 apresentou um (*EIS*) igual a 3,57 mantendo-se em uma classificação entre 1 e 5 sendo então também sustentável em um médio período. Deste modo o fluido R134a apresenta-se como uma melhor opção em termos de sustentabilidade avaliado segundo o (*EIS*) em relação ao NH_3 , considerando a aplicação neste ciclo ORC.

5.4 – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A partir dos resultados obtidos na Seção (5.3) foi possível construir a Tab. (5.73) contendo os dados de potência e eficiência térmica dos ciclos termodinâmicos, massa do sistema e do fluido de trabalho bem como o índice emergético de sustentabilidade, conforme apresentado abaixo:

Tabela 5.73 – Comparação dos dados termodinâmicos e emergéticos para os diferentes ciclos ORC e seus respectivos fluidos de trabalho.

Ciclos ORC	<i>EIS</i>	$\dot{W}_{ciclo}$ [kW]	η [%]	Massa de fluido [kg]	Massa dos componentes [kg]
Reversível R134a	3,92	303,40	12,74	2.026,02	116.060,59
Reversível NH_3	3,67	343,88	14,44	2.193,64	114.898,70
Irreversível R134a	4,07	249,31	10,47	1.724,08	117.004,83
Irreversível NH_3	3,85	288,02	12,10	1.867,27	115.765,34
Reversível regenerativo R134a	3,56	321,70	13,51	2.160,51	127.640,94
Reversível regenerativo NH_3	3,50	356,85	14,99	2.279,23	118.847,49
Irreversível regenerativo R134a	3,64	288,98	12,14	1.993,48	128.211,67
Irreversível regenerativo NH_3	3,57	328,35	13,79	2.121,45	119.071,71

Ao analisar os dados da Tab. (5.73), foi possível verificar que o índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) diminui na medida em que outros componentes são adicionados ao ciclo ORC para melhorar sua eficiência térmica, conforme decaimento entre os valores dos ciclos básicos (reversível e irreversível) e os ciclos regenerativos. Isso de fato era esperado pois, como a análise emergética leva em consideração todos os insumos necessários para a fabricação e operação dos componentes do sistema de geração de potência, aumentar a massa do sistema acarreta em um aumento do carregamento emergético (*ELR*) e consequentemente na diminuição

do índice emergético de sustentabilidade (*EIS*), tornando o sistema mais distante de uma sustentabilidade a longo prazo.

Entretanto a diferença entre os índices (*EIS*) verificados entre os ciclos ORC básicos reversíveis e irreversíveis, e separadamente entre os ciclos regenerativos reversíveis e irreversíveis não ocorreu conforme o esperado. Isto pois, um sistema irreversível por si só é inferior em termos energéticos a um ciclo ideal (reversível) devido as suas irreversibilidades, logo devido a esta perda esforços adicionais são necessários para cobrir esta deficiência, ou seja, seriam necessários mais insumos para manter o ciclo operante. Verificando item a item para encontrar qual característica estaria relacionada diretamente com esta divergência entre o resultado esperado, segundo a Tab. (5.73), foi constatado que a massa do fluido de trabalho diminui ao comparar o mesmo modelo de ciclo alterando apenas a inserção da irreversibilidade.

Observando no ciclo ORC reversível, nota-se que a massa do fluido R134a foi de 2.026,02 kg enquanto para o ciclo ORC irreversível a massa do fluido R134a foi de 1.724,08 kg, isto ocorre porque a massa do fluido de trabalho é dada pela equação (3.61). Esta equação considera a potência produzida pela turbina onde, devido as irreversibilidades, a potência produzida pela turbina diminui e consequentemente o cálculo da massa do fluido de trabalho também diminuiu.

Semelhantemente o dimensionamento das massas da(s) turbina(s) e bomba também apresentaram diferença ao comparar os ciclos reversíveis e irreversíveis pois, a Eq. (3.60) que dimensiona a massa desses componentes, também considera a potência produzida pela(s) turbina(s) e consumida pela bomba, acarretando em uma diminuição de massa da(s) turbina(s) e um aumento da massa da bomba.

Ao dimensionarmos um sistema de geração de potência as irreversibilidades são conhecidas e consideradas de modo que, para burlá-las o sistema acaba sendo superdimensionado. O mesmo aconteceu com a massa dos trocadores de calor quando analisados separadamente, o evaporador dos ciclos irreversíveis ficaram semelhantes em comparação aos ciclos equivalentes reversíveis (diferença de 0,2%), enquanto os condensadores dos ciclos irreversíveis ficaram maiores em comparação aos ciclos equivalentes irreversíveis (diferença de 2,5%). O equacionamento proposto por Zhang *et al.* (2018) não considera esta questão, de modo que as massas dos equipamentos culminam um superdimensionamento para o condensador em relação ao ciclo reversível equivalente.

A fim de suprir esta deficiência na consideração das irreversibilidades apresentada no equacionamento dos autores, um novo método será proposto e analisado na seção seguinte.

5.5 – NOVO MÉTODO

Com o intuito de considerar as irreversibilidades na contabilização das massas dos componentes dos ciclos ORC um novo método será proposto, de modo que para isso serão testadas algumas considerações a fim de verificar o seu impacto no resultado do (*EIS*) de cada ciclo irreversível. Estas considerações podem ser visualizadas a seguir:

1. Vazão mássica do fluído de trabalho igual ao ciclo sem irreversibilidade;
2. Massas da(s) turbina(s), bomba e fluído de trabalho avaliadas sem irreversibilidades;
3. Taxa de transferência de calor do condensador fixada para o ciclo reversível e irreversível.

A finalidade da Consideração 1 incide na verificação do impacto em que a mudança da vazão mássica do fluído de trabalho afeta o índice emergético de sustentabilidade, uma vez em que conforme dados obtidos na Tab. (5.73), os ciclos reversíveis apresentaram quantidade de massa de fluído de trabalho maior em relação aos seus ciclos equivalentes irreversíveis.

Já a Consideração 2 também parte do princípio de compensar a massa de fluído de trabalho, uma vez que a mesma é dimensionada a partir da Eq. (3.61) onde se utiliza a potência produzida pela turbina. Sabe-se que o ciclo reversível, por não possuir irreversibilidade, produz um trabalho líquido e rendimento maior devido a maior potência produzida. Deste modo, com esta consideração haverá uma tentativa em suprir a carência na formulação apresentada pelos autores Zhan *et al.* (2018) e para que haja um balanço em termos de igualdade de considerações, o método se estenderá para a bomba também.

A Consideração 3 parte da comparação entre os trocadores de calor dos ciclos reversíveis e não reversíveis, uma vez que os evaporadores dos ciclos reversíveis são praticamente iguais em comparação aos do ciclo irreversível, entretanto os condensadores dos ciclos reversíveis são menores em comparação aos ciclos

irreversíveis. Desse modo, nesta etapa a taxa de transferência de calor do condensador será fixada em um valor igual em relação aos ciclos reversíveis e irreversíveis a partir da aplicação da primeira lei da termodinâmica utilizando o ciclo todo como um volume de controle, a fim de criar uma mesma base para comparação dos resultados emergéticos.

5.5.1 – Consideração 1

A partir da Consideração 1 (vazão mássica do fluído de trabalho igual ao ciclo sem irreversibilidade) apresentada na Seção (5.5), a Seção (5.2) será novamente calculada para o ciclo irreversível abordado neste estudo para todos os fluídos de trabalho. As propriedades termodinâmicas calculadas na Seção (5.1.2) serão as mesmas com exceção das vazões mássicas, que conforme a Consideração 1, foram retiradas das tabelas contidas na Seção (5.1.1).

5.5.1.1 – Ciclo ORC irreversível

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível apresentadas na Seção (3.1.2) do Cap. (3) foram obtidas de acordo com o procedimento apresentado na Seção (5.1.2). Entretanto, a coluna correspondente a vazão mássica das tabelas Tab. (5.3) e Tab. (5.4) para os fluídos R134a e NH_3 respectivamente, foram substituídas pelas vazões presentes nas tabelas Tab. (5.1) e Tab. (5.2) para os fluídos R134a e NH_3 respectivamente.

Esses novos dados podem ser visualizados na Tab. (5.74) para o ciclo com R134a e Tab. (5.75) para o NH_3 .

Tabela 5.74 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	32,47	90	13,123	277,10
2s	7,706	30	13,123	251,90
2	7,706	30	13,123	255,70
3	7,706	30	13,123	93,58
4s	32,47	31,45	13,123	95,65
4	32,47	31,70	13,123	96,02
5	1,013	120	1,000	2.716,00
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	99,551	83,93
8	1.013	25	99,551	104,80

Tabela 5.75 – Propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ utilizando a Consideração 1.

Estado ORC	p (bar)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)
1	51,16	90	2,144	1.459,00
2s	11,67	30	2,144	1.292,00
2	11,67	30	2,144	1.317,00
3	11,67	30	2,144	341,80
4s	51,16	31,09	2,144	348,40
4	51,16	31,33	2,144	349,60
5	1,013	120	1,000	2.716,00
6	1,013	80	1,000	335,00
7	1,013	20	97,61	83,93
8	1.013	25	97,61	104,80

Através das propriedades termodinâmicas apresentadas nas tabelas Tab. (5.74) e Tab. (5.75) e o equacionamento apresentado na Seção (3.1.2) obteve-se as taxas de energia para o evaporador, condensador, turbina e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.74) para o fluido R134a e Tab. (5.75) para o fluido NH₃.

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas Tab. (5.76) e Tab. (5.77) para o fluido R134a e NH₃ respectivamente.

Tabela 5.76 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	883,423	14.011,09	2.376,31
Turbina	-	8.767,51	280,83
Condensador	5.898,253	93.546,29	2.127,50
Bomba	-	448,28	32,02
R134a	-	1.720,65	-
Total	6.881,676	118.493,82	248,81¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.77 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ utilizando a Consideração 1.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	880,634	13.966,85	2.378,55
Turbina	-	9.504,87	304,45
Condensador	5.797,008	91.940,55	2.090,83
Bomba	-	234,13	16,72
NH ₃	-	1.865,35	-
Total	6.677,642	117.511,75	287,73¹

(1) Potência líquida do ciclo

5.5.1.2 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.78) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos apresentada na Tab. (5.76) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH₃ onde, através da Tab. (5.77) obtém-se a Tab. (5.79).

Tabela 5.78 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,36 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,00 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,95 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,95 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,00 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,00 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,47 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,24 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,42 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,37 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,45 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,10 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,97 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,97 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,58 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,92 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,09 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,64 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,04 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,35 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,82 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,7610^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,64 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,06 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,06 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,18 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,89 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,11 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,32 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,45 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,66 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,10 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,54 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,04 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,60 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,50 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,50 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,14 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,04 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,60 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,95 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,37 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,92 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,50 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,11 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,10 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,67 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,17 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.79 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,34 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$6,93 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,92 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,92 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,95 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$9,95 \cdot 10^{14}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,46 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,18 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,39 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,31 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,43 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,08 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,94 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,96 \cdot 10^{14}$
Eletricidade Hidráulica (t) ¹			$1,57 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,89 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,06 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,58 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$6,97 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,33 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,79 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,66 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,62 \cdot 10^{13}$
Cimiritito (t) ¹				$6,00 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,00 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,09 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,85 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,08 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,31 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,40 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,61 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,03 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,52 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,01 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,57 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,47 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,47 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,10 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,01 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,57 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,86 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,32 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,89 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,47 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,09 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,09 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,64 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,37 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,16 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.80) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Tab. (5.76) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.77) obtém-se a Tab. (5.81) .

Tabela 5.80 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$4,30 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,86 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$6,71 \cdot 10^{-1}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$1,83 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$2,58 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$2,93 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$1,40 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$3,61 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,61 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$2,75 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,37 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$5,33 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$5,33 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$8,60 \cdot 10^{-1}$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$3,48 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$7,43 \cdot 10^9$		$1,17 \cdot 10^5$	$8,70 \cdot 10^{14}$
Calor (J) ¹				$4,82 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$2,92 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$1,72 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.81 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 1.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Água (t) ¹	$2,97 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,97 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,54 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$6,22 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do Carvão (J) ¹				$7,39 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$8,64 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$1,87 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.1.3 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.82) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.76).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH₃ onde, através da Tab. (5.77) obtém-se a Tab. (5.83).

Tabela 5.82 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,07 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,34 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.83 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.1.4 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.84) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Tab. (5.76).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.77) obtém-se a Tab. (5.85).

Tabela 5.84 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,74 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,79 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.85 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 1.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,69 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,76 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.1.5 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.86) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.76). Para obtenção da transformada do produto (T_r) foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.78), Tab. (5.80), Tab. (5.82) e Tab. (5.84).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.77), Tab. (5.79), Tab. (5.81), Tab. (5.83) e Tab. (5.85), obtêm-se a Tab. (5.87).

Tabela 5.86 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 1.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,25 \cdot 10^{14}$		$4,37 \cdot 10^5$	

Tabela 5.87 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH₃ referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 1.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,45 \cdot 10^{14}$	$3,78 \cdot 10^5$	

5.5.1.6 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.88) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.78), Tab. (5.80), Tab. (5.82), Tab. (5.84) e Tab. (5.86).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.79), Tab. (5.81), Tab. (5.83), Tab. (5.85) e Tab. (5.87), obtêm-se a Tab. (5.89).

Tabela 5.88 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a utilizando a Consideração 1.

R	N	F_r	F_n
$1,03 \cdot 10^{18}$	$5,35 \cdot 10^{19}$	$4,77 \cdot 10^{16}$	$2,24 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.89 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH₃ utilizando a Consideração 1.

R	N	F_r	F_n
$1,02 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$7,49 \cdot 10^{16}$	$2,18 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.88) para o ciclo com o fluído R134a e Tab. (5.89) para o fluido NH₃ juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluído R134a podem ser visualizados na Tab. (5.90) e para o fluído NH₃ na Tab. (5.91).

Tabela 5.90 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 1.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,48 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$4,37 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$2,02 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,97 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$4,97 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	4,07

Tabela 5.91 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 1.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,78 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,88 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,93 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,36 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,80

Pode-se verificar que, entre os fluídos analisados o índice emergético (EIS) ficou entre o intervalo de 1 e 5, entretanto ainda mantiveram-se maior que os índices (EIS) apresentados para o ciclo ORC reversível, resultado este fisicamente ainda incongruente devido as irreversibilidades do sistema. Para o fluido R134a o valor do (EIS) foi o mesmo para os cálculos do ciclo irreversível utilizando e não utilizando a Consideração 1 (4,07), entretanto para o fluído NH_3 o valor diminui de 3,85 para 3,80, mas ainda sim mantendo um (EIS) maior em relação ao ciclo reversível de 3,67. Deste modo, fica claro que utilizar a Consideração 1 apresentada na Seção (5.5) não resolve o problema do equacionamento para o cálculo do (EIS) para os ciclos irreversíveis. Deste modo, partiremos para a análise do ciclo utilizando a Consideração 2 apresentada na Seção (5.5) para verificar se essa deficiência equacional poderá ser solucionada.

5.5.2 – Consideração 2

A partir da Consideração 2 (massas da(s) turbina(s), bomba e fluído de trabalho avaliadas sem irreversibilidades) apresentada na Seção (5.5), a Seção (5.2) será novamente calculada para o ciclo irreversível abordado neste estudo utilizando todos os fluídos de trabalho a fim de verificar se haverá diminuição no (*EIS*) dos ciclos irreversíveis. As propriedades termodinâmicas serão as mesmas calculadas na Seção (5.1.2) com as vazões mássicas calculadas de acordo com o ciclo irreversível e não reversível, como foi apresentado na Seção (5.5.1).

5.5.2.1 – Ciclo ORC irreversível

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível apresentadas no item (3.1.2) do Cap. (3) foram obtidas de acordo com o procedimento apresentado na Seção (5.1) e são as mesmas apresentadas nas tabelas Tab. (5.3) e Tab. (5.4) para os fluídos R134a e NH₃, respectivamente.

As taxas de energia para o evaporador, condensador, turbina e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluído de trabalho foram obtidas de acordo com os cálculos apresentados na Seção (5.2.2). A diferença entre esta seção e a Seção (5.2.2) é que as massas da turbina, bomba e fluído de trabalho serão calculadas utilizando a potência produzida pela bomba e consumida pela turbina desconsiderando a irreversibilidade. Essas taxas e massas serão calculadas a seguir para o ciclo contendo o fluído R134a com o auxílio da Tab. (5.3). O mesmo procedimento é válido para os fluído NH₃ utilizando a Tab. (5.4).

Da Eq. (3.2) para o evaporador, Eq. (3.15) para a turbina, Eq. (3.8) para o condensador e Eq. (3.20) para a bomba obtém-se:

$$\dot{Q}_{eva} = 13,149 \cdot (277,10 - 96,02) = 2.381,02 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_t = 13,149 \cdot (277,10 - 255,70) = 281,39 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{con} = 13,149 \cdot (255,70 - 93,58) = 2.131,39 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_b = 13,147 \cdot (96,02 - 93,58) = 32,08 \text{ kW}$$

Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo.

A partir dos dados da Tab. (4.1), das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3) para o fluido R134a e do equacionamento apresentado na Seção (3.2.1), pode-se calcular a área do evaporador e do condensador a partir da Eq. (3.59) e suas respectivas massas a partir da Eq.(3.58), conforme apresentado a seguir:

$$A_{eva} = \frac{2.381,02 \cdot 10^3}{70 \cdot 38,427} = 885,174 \text{ m}^2$$

$$A_{con} = \frac{2.131,39 \cdot 10^3}{50 \cdot 7,214} = 5.909,038 \text{ m}^2$$

$$m_{eva} = 7.930 \cdot 885,174 \cdot 0,002 = 14.038,86 \text{ kg}$$

$$m_{con} = 7.930 \cdot 5.909,038 \cdot 0,002 = 93.717,34 \text{ kg}$$

Já para o cálculo das massas da turbina e da bomba, foram utilizados os dados da Tab. (4.1), as propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3), a Eq. (3.17) para o cálculo da potência produzida isentrópicamente pela turbina e a Eq. (3.22) para o cálculo da potência consumida pela bomba isentrópicamente de modo que, a partir da Eq. (3.60), obteve-se as massas da turbina e bomba respectivamente, conforme abaixo:

$$\dot{W}_{ts} = 13,149 \cdot (277,10 - 251,90) = 331,36 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{bs} = 13,149 \cdot (95,65 - 93,58) = 27,22 \text{ kW}$$

$$m_t = 31,22 \cdot 331,36 = 10.345,06 \text{ kg}$$

$$m_b = 14 \cdot 27,22 = 381,08 \text{ kg}$$

Por fim, para obtenção da massa do fluido de trabalho R134a utilizou-se os dados da Tab. (4.1), as propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3), a potência produzida pela turbina isentrópicamente calculada anteriormente e a Eq. (3.61), obtendo-se:

$$m_{ft} = 0,1 \cdot (5,57 \cdot 331,36) + (5,57 \cdot 331,36) = 2.030,24 \text{ kg}$$

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes também são válidos para os fluido NH_3 e podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.92) e Tab. (5.93) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3 .

Tabela 5.92 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 2.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	885,174	14.038,86	2,381,02
Turbina	-	10.345,06	281,39
Condensador	5.909,038	93.717,34	2.131,39
Bomba	-	381,08	32,08
R134a	-	2.030,24	-
Total	6.794,212	120.512,58	249,31¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.93 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 2.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	881,539	13.981,21	2.381,00
Turbina	-	11.189,76	304,76
Condensador	5.802,971	92.035,12	2.092,98
Bomba	-	198,31	16,74
NH_3	-	2.196,02	-
Total	6.684,51	119.600,42	228,02¹

(1) Potência líquida do ciclo

5.5.2.2 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) para obtenção dos dados emergéticos, contabilizando os insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), considerando que os equipamentos utilizados no ciclo foram construídos com o aço apresentado na Tab. (4.1) e possuindo a massa dos equipamentos apresentada na Tab. (5.92) para o fluido R134a, foi possível obter a Tab. (5.94) contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos assim como suas respectivas transformadas e emergia. A transformada do produto para o aço (T_r) foi calculada a partir da equação presente na Tab. (3.2). O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.93) obtém-se a Tab. (5.95).

Tabela 5.94 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,38 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,10 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,99 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,99 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,02 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,02 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,49 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,33 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,47 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,46 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,49 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,13 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,02 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,00 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,61 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,96 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,14 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,74 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,14 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,38 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,86 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,90 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,68 \cdot 10^{13}$
Cimirito (t) ¹				$6,15 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,15 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,31 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,95 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,16 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,34 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,53 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,73 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,51 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,58 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,08 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,63 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,56 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,56 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,18 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,08 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,63 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,08 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,43 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,96 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,53 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,14 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,11 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,71 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,18 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.95 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,36 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,04 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,97 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$2,97 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,01 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,01 \cdot 10^{15}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,48 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,28 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,44 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,40 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,47 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,11 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,99 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$1,98 \cdot 10^{14}$
Eletricidade Hidráulica (t) ¹			$1,59 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,93 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,11 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,68 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,08 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,36 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,84 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,81 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,66 \cdot 10^{13}$
Cimiritito (t) ¹				$6,09 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,09 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,23 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,91 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,13 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,32 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,48 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,69 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,14 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,56 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,05 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,61 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,52 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,52 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,15 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,05 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,61 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,00 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,39 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,94 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,51 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,12 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,00 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,68 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,17 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.96) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Tab. (5.92) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.93) obtém-se a Tab. (5.97).

Tabela 5.96 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$5,08 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,37 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$7,92 \cdot 10^{-1}$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$2,15 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$3,05 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$1,64 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$3,45 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$1,66 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$4,26 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$4,26 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$3,25 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,79 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$6,29 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,29 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,02 \cdot 10^0$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$4,11 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$8,77 \cdot 10^9$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^{15}$
Calor (J) ¹				$5,68 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$3,45 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$2,03 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.97 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$3,49 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,32 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,81 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,32 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$8,70 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$2,20 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.2.3 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.98) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.92).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.93) obtém-se a Tab. (5.99).

Tabela 5.98 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,07 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.99 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.2.4 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.100) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Tab. (5.92).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.93) obtém-se a Tab. (5.101).

Tabela 5.100 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,84 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,85 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.101 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,80 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,83 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.2.5 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4), mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.102) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.92). Para obtenção da transformada do produto (T_r), foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.94), Tab. (5.96), Tab. (5.98) e Tab. (5.100).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.93), Tab. (5.95), Tab. (5.97), Tab. (5.99) e Tab. (5.101), obtêm-se a Tab. (5.103).

Tabela 5.102 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,26 \cdot 10^{14}$		$4,37 \cdot 10^5$	

Tabela 5.103 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,45 \cdot 10^{14}$	$3,78 \cdot 10^5$	

5.5.2.6 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.104) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.94), Tab. (5.96), Tab. (5.98), Tab. (5.100) e Tab. (5.102).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.95), Tab. (5.97), Tab. (5.99), Tab. (5.101) e Tab. (5.103), obtêm-se a Tab. (5.105).

Tabela 5.104 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a utilizando a Consideração 2.

R	N	F_r	F_n
$1,04 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$5,42 \cdot 10^{16}$	$2,27 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.105 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH_3 utilizando a Consideração 2.

R	N	F_r	F_n
$1,02 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,61 \cdot 10^{16}$	$2,21 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.104) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.105) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a podem ser visualizados na Tab. (5.106) e para o fluido NH_3 na Tab. (5.107).

Tabela 5.106 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 2.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$4,37 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,95 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,94 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,15 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,95

Tabela 5.107 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 2.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,78 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,79 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$4,88 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,62 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,66

Pode-se verificar que o (EIS) obtido para o fluido R134a foi menor em relação ao procedimento aplicado na Seção (5.5.1) mudando de 4,07 para 3,95, entretanto ainda encontra-se maior em relação ao ciclo reversível presente na Tab. (5.73) no valor de 3,92, ou seja, foi relevante a mudança ao serem considerados os valores isentrópicos para o dimensionamento da turbina e da bomba e também para o dimensionamento da quantidade de fluido de trabalho necessário para manter o ciclo operante.

Já para o fluido NH_3 , a redução obtida em relação a Seção (5.5.1) para o (EIS) foi de 3,80 para 3,66. Este valor ficou menor em relação ao ciclo reversível que segundo a Tab. (5.73) foi de 3,67, mostrando que o novo método considerando o dimensionamento da turbina, bomba e fluido de trabalho com configuração isentrópica aproxima o dimensionamento dos componentes do ciclo ORC à realidade em termos emergéticos, uma vez que ao dimensionarmos o ciclo utilizamos seus dados nominais para que não sejam subdimensionados.

O novo método mostrou uma redução de 2,95% no (*EIS*) para o fluido R134a e 3,67% para o fluido NH₃. Os valores de redução foram muitos próximos, entretanto não foram suficientes para corrigir o índice (*EIS*) para o fluido R134a. Sendo assim, na próxima seção será utilizada a Consideração 3 juntamente com a Consideração 2 apresentadas na Seção (5.5) a fim de solucionar a redução do índice emergético de sustentabilidade para ambos os fluidos utilizados neste estudo.

5.5.3 – Consideração 2 e 3

A partir da Consideração 2 (massas da(s) turbina(s), bomba e fluido de trabalho avaliadas sem irreversibilidades) e Consideração 3 (Taxa de transferência de calor do condensador fixada para o ciclo reversível e irreversível) apresentadas na Seção (5.5), a Seção (5.2) será novamente calculada para o ciclo irreversível abordado neste estudo para todos os fluidos de trabalho a fim de verificar se haverá diminuição no (*EIS*) dos ciclos irreversíveis, principalmente para o fluido R134a onde apenas a Consideração 2 não foi suficiente para correção do índice emergético de sustentabilidade. As propriedades serão as mesmas calculadas na Seção (5.1.2) com as vazões mássicas calculadas de acordo com o ciclo irreversível, e não reversível como foi apresentado na Seção (5.5), mas a taxa de transferência de calor para o condensador será obtida através da aplicação da primeira lei da termodinâmica considerando o ciclo todo no volume de controle.

5.5.3.1 – Ciclo ORC irreversível

As propriedades termodinâmicas para o ciclo ORC irreversível apresentadas na Seção (3.1.2) do Cap. (3) foram obtidas de acordo com o procedimento apresentado na Seção (5.1) e são as mesmas apresentadas nas tabelas Tab. (5.3) e Tab. (5.4) para os fluidos R134a e NH₃, respectivamente.

As potências da turbina e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho foram obtidas de acordo com os cálculos apresentados na Seção (5.2.2). A diferença entre esta seção e a Seção (5.2.2) é que as massas da turbina, bomba e do fluido de trabalho serão calculadas utilizando a potência produzida pela bomba e consumida pela turbina desconsiderando as irreversibilidades. Já a taxa de energia para o condensador foi obtida a partir da Eq. (3.2), utilizando as potências sem

irreversibilidade a fim de utilizar uma mesma base de comparação entre os ciclos reversíveis e irreversíveis.

Essas taxas e massas serão calculadas a seguir para o ciclo contendo o fluido R134a com o auxílio da Tab. (5.3). O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 utilizando a tabela Tab. (5.4).

Da Eq. (3.2) para o evaporador, Eq. (3.15) para a turbina, Eq. (3.20) para a bomba, Eq. (3.17) para o cálculo da potência produzida sem irreversibilidades pela turbina e a Eq. (3.22) para o cálculo da potência consumida pela bomba sem irreversibilidade, obtém-se:

$$\dot{Q}_{eva} = 13,149 \cdot (277,01 - 96,02) = 2.381,02 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_t = 13,149 \cdot (277,10 - 255,70) = 281,39 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_b = 13,147 \cdot (96,02 - 93,58) = 32,08 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{ts} = 13,149 \cdot (277,10 - 251,90) = 331,36 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{bs} = 13,149 \cdot (95,65 - 93,58) = 27,22 \text{ kW}$$

Para o cálculo da taxa de energia do condensador, aplicando a primeira lei da termodinâmica considerando o ciclo todo no volume de controle e utilizando as potências isentrópicas do sistema, têm-se:

$$\Delta \dot{Q} = \Delta \dot{W} \rightarrow \dot{Q}_{ciclo} = \dot{W}_{ciclo} \rightarrow \dot{Q}_{eva} - \dot{Q}_{con} = \dot{W}_{ts} - \dot{W}_{bs} \rightarrow \dot{Q}_{eva} + \dot{W}_{bs} = \dot{W}_{ts} + \dot{Q}_{con}$$

$$\therefore \dot{Q}_{con} = \dot{Q}_{eva} + \dot{W}_{bs} - \dot{W}_{ts}$$

$$\dot{Q}_{con} = 2.381,02 + 27,22 - 331,36 = 2.076,88 \text{ kW}$$

Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo.

A partir dos dados da Tab. (4.1), das propriedades termodinâmicas apresentadas anteriormente nesta seção para o fluido R134a e do equacionamento apresentado na Seção (3.2.1), pode-se calcular a área do evaporador e do condensador a partir da Eq. (3.59) e suas respectivas massas a partir da Eq.(3.58), conforme apresentado a seguir:

$$A_{eva} = \frac{2.381,02 \cdot 10^3}{70 \cdot 38,427} = 885,174 \text{ m}^2$$

$$A_{con} = \frac{2.076,88 \cdot 10^3}{50 \cdot 7,214} = 5.757,915 \text{ m}^2$$

$$m_{eva} = 7.930 \cdot 885,174 \cdot 0,002 = 14.038,86 \text{ kg}$$

$$m_{con} = 7.930 \cdot 5.757,915 \cdot 0,002 = 931.330,53 \text{ kg}$$

Já para o cálculo das massas da turbina e da bomba, foram utilizados os dados da Tab. (4.1), as propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3), a potência produzida/consumida pela turbina/bomba isentropicamente de modo que, a partir da Eq. (3.60) obteve-se as massas da turbina e bomba respectivamente, conforme abaixo:

$$m_t = 31,22 \cdot 331,36 = 10.345,06 \text{ kg}$$

$$m_b = 14 \cdot 27,22 = 381,08 \text{ kg}$$

Por fim, para obtenção da massa do fluido de trabalho R134a utilizou-se os dados da Tab. (4.1), as propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.3), a potência produzida pela turbina isentrópicamente calculada anteriormente e a Eq. (3.61), obtendo-se:

$$m_{ft} = 0,1 \cdot (5,57 \cdot 331,36) + (5,57 \cdot 331,36) = 2.030,24 \text{ kg}$$

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes também são válidos para os fluido NH₃. Esses resultados podem ser

visualizados nas tabelas Tab. (5.108) e Tab. (5.109) respectivamente para os fluídos R134a e NH₃.

Tabela 5.108 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 2 e 3.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	885,174	14.038,86	2.381,02
Turbina	-	10.345,06	281,39
Condensador	5.757,915	91.320,53	2.076,88
Bomba	-	381,08	32,08
R134a	-	2.030,24	-
Total	6.643,089	118.115,77	249,31¹

(1) Potência líquida do ciclo.

Tabela 5.109 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ utilizando a Consideração 2 e 3.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	881,539	13.981,21	2.381,00
Turbina	-	11.189,76	304,76
Condensador	5.647,066	89.562,47	2.036,75
Bomba	-	198,31	16,74
NH ₃	-	2.196,02	-
Total	6.528,605	117.127,77	228,02¹

(1) Potência líquida do ciclo

5.5.3.2 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.110) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos explícita na Tab. (5.108) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.109) obtém-se a Tab. (5.111).

Tabela 5.110 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,35 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$ $6,96 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,93 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $2,93 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,99 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $9,99 \cdot 10^{14}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,46 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$ $6,21 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,40 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$ $6,33 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,44 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,09 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,96 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$ $1,96 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,57 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$ $1,26 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,90 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $3,07 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,60 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $7,00 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,34 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$ $2,80 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,70 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$ $2,63 \cdot 10^{13}$
Cimirito (t) ¹				$6,03 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $6,03 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,13 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $3,87 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $1,31 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,42 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $4,63 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,06 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$ $2,53 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,02 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,58 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,48 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $3,48 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,12 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$ $1,24 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,02 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,58 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,90 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$ $4,34 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,90 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,48 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$) ¹				$2,09 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,09 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$) ¹				$2,65 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,38 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,16 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.111 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,34 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$ $6,89 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$2,90 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $2,90 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$9,89 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$ $9,89 \cdot 10^{14}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,45 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$ $6,14 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,37 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$ $6,27 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,42 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,07 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$2,93 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$ $1,94 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,56 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$ $1,25 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,87 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $3,04 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,53 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$ $6,93 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,31 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$ $2,78 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,60 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$ $2,60 \cdot 10^{13}$
Cimiroto (t) ¹				$5,97 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $5,97 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,04 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $3,83 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,06 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$ $1,30 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,36 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $4,59 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$6,99 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$ $2,50 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$2,99 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,56 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,45 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$ $3,45 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$ $1,23 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$2,99 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,56 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$8,81 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$ $4,30 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,88 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$ $2,46 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,07 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,08 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,63 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$ $1,37 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,15 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.112) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Tab. (5.108) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.109) obtém-se a Tab. (5.113).

Tabela 5.112 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Água (t) ¹	$5,08 \cdot 10^1$						$6,64 \cdot 10^{11}$	$3,37 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$7,92 \cdot 10^{-1}$					$2,72 \cdot 10^{15}$	$2,15 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$3,05 \cdot 10^{-1}$					$5,40 \cdot 10^4$	$1,64 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$3,45 \cdot 10^{-1}$					$4,80 \cdot 10^4$	$1,66 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$4,26 \cdot 10^{-1}$					$1,00 \cdot 10^{15}$	$4,26 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$3,25 \cdot 10^{-1}$					$8,60 \cdot 10^{14}$	$2,79 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$6,29 \cdot 10^0$					$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,29 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,02 \cdot 10^0$				$4,05 \cdot 10^{16}$	$4,11 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do								
Carvão (J) ¹				$8,77 \cdot 10^9$			$1,17 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^{15}$
Calor (J) ¹				$5,68 \cdot 10^{10}$			$6,07 \cdot 10^4$	$3,45 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$2,03 \cdot 10^0$		$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.113 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível referente a fase de construção utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Água (t) ¹	$3,49 \cdot 10^0$						$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,32 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,81 \cdot 10^0$				$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,32 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do								
Carvão (J) ¹				$8,70 \cdot 10^7$			$1,17 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$2,20 \cdot 10^0$		$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.3.3 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.114) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.108).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.109) obtém-se a Tab. (5.115).

Tabela 5.114 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,05 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{18}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.115 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluído NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Operação							T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,03 \cdot 10^{15}$						$9,63 \cdot 10^2$	$9,89 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹		$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.3.4 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.116) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo apresentada na Tab. (5.108).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH₃ onde, através da Tab. (5.109) obtém-se a Tab. (5.117).

Tabela 5.116 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,73 \cdot 10^{10}$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,78 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.117 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH₃ referente a fase de operação utilizando a Consideração 2 e 3.

Fase de Desativação							T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,68 \cdot 10^9$		$6,60 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.3.5 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.118) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.108). Para obtenção da transformada do produto (T_r) foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.110), Tab. (5.112), Tab. (5.114) e Tab. (5.116).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.109), Tab. (5.111), Tab. (5.113) e Tab. (5.115) e Tab. (5.117), obtêm-se a Tab. (5.119).

Tabela 5.118 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2 e 3.

PRODUTO							T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P			
ELETRICIDADE (J)					$1,26 \cdot 10^{14}$		$4,37 \cdot 10^5$	

Tabela 5.119 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 referente ao produto do ciclo utilizando a Consideração 2 e 3.

PRODUTO							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,45 \cdot 10^{14}$	$3,78 \cdot 10^5$	

5.5.3.6 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível, foi possível obter a Tab. (5.120) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.110), Tab. (5.112), Tab. (5.114), Tab. (5.116) e Tab. (5.118).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH_3 onde, através das tabelas Tab. (5.111), Tab. (5.113), Tab. (5.115), Tab. (5.117) e Tab. (5.119), obtêm-se a Tab. (5.121).

Tabela 5.120 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido R134a utilizando a Consideração 2 e 3.

R	N	F_r	F_n
$1,01 \cdot 10^{18}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$5,39 \cdot 10^{16}$	$2,23 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.121 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível com o fluido NH_3 utilizando a Consideração 2 e 3.

R	N	F_r	F_n
$9,89 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,58 \cdot 10^{16}$	$2,16 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.120) para o ciclo com o fluido R134a e Tab. (5.121) para o fluido NH_3 juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados para o fluido R134a podem ser visualizados na Tab. (5.122) e para o fluido NH_3 na Tab. (5.123).

Tabela 5.122 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido R134a utilizando a Consideração 2 e 3.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$4,37 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,98 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,07 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,07 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,91

Tabela 5.123 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível com fluido NH_3 utilizando a Consideração 2 e 3.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,78 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,82 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,01 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,04 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,63

Pode-se verificar que em relação o fluido R134a o (EIS) obtido foi menor em relação ao procedimento aplicado na Seção (5.5.2), mudando de 3,95 para 3,91. Nesta seção, utilizando as Considerações 2 e 3 apresentadas na Seção (5.5) foi possível obter um índice emergético de sustentabilidade menor para o ciclo irreversível em comparação com o ciclo reversível, que possui valor de 3,92 de acordo com a Tab. (5.73). Isso mostra que as Considerações 2 e 3 representaram fisicamente as distinções entre esses ciclos devido a presença ou não de irreversibilidades, a partir da criação de um parâmetro em comum (taxas de transferência de calor dos trocadores de calor) como base de comparação entre os índices emergéticos.

Já para o fluido NH_3 , a redução obtida em relação a Seção (5.5.2) pra o (EIS) foi de 3,66 para 3,63. Este valor também ficou menor em relação ao ciclo reversível que segundo a Tab. (5.73) que foi de 3,67, mostrando também que ao criar uma base igual de comparação entre os dois tipos de ciclos (reversível e irreversível) o índice

emergético de sustentabilidade segue a tendência da eficiência térmica quando comparamos ciclos com ou sem irreversibilidades, ou seja: Ciclos reversíveis possuem eficiência térmica maior e índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) maior em comparação ao mesmo ciclo com presença de irreversibilidades.

O novo método mostrou uma redução de 0,25% no (*EIS*) para o fluido R134a e 1,09% para o fluido NH₃ comparando os ciclo reversível com o ciclo irreversível. Esta redução foi suficiente para representar o comportamento do índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) para se comprar ciclos com ou sem irreversibilidade.

5.5.4 – Expansão do novo método para o Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

Segundos os testes realizados entre as Seções (5.5.1) a (5.5.3), foi possível definir um método que criasse uma base igualitária para análise dos ciclos com e sem irreversibilidade a partir da adoção das Considerações 2 e 3 apresentadas na Seção (5.5). Com isto, este novo método será expandido para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado.

A partir da Consideração 2 (massas da(s) turbina(s), bomba e fluido de trabalho avaliadas sem irreversibilidades) e Consideração 3 (Taxa de transferência de calor do condensador fixado para o ciclo reversível e irreversível) apresentadas na Seção (5.5), a Seção (5.2) será novamente calculada para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado abordado neste estudo para todos os fluidos de trabalho. As propriedades serão as mesmas calculadas na Seção (5.1.4), com as vazões mássicas calculadas de acordo com o ciclo irreversível, mas a taxa de transferência de calor para o condensador será utilizada de acordo com a aplicação da primeira lei da termodinâmica considerando o ciclo todo como volume de controle.

5.5.4.1 – Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado

Através das propriedades termodinâmicas obtidas na Seção (5.1.4), o equacionamento apresentado na Seção (3.1.4) e a metodologia apresentada na Seção (5.5.3.1) para o ciclo irreversível, mas agora para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, obteve-se as taxas de energia para o evaporador,

condensador, turbina(s) e bomba assim como suas respectivas massas e a massa do fluido de trabalho. Após a obtenção das taxas de energia produzidas/consumidas no ciclo, foram calculadas as massas de cada um dos componentes do ciclo a partir do equacionamento apresentado na Seção (3.2), dos dados da Tab. (4.1) e das propriedades termodinâmicas apresentadas na Tab. (5.7) para o fluido R134a e Tab. (5.8) para o fluido NH_3 .

Os resultados obtidos nesta seção contendo as taxas de energia, área e massa dos componentes podem ser visualizados nas tabelas Tab. (5.124) e Tab. (5.125) respectivamente para os fluidos R134a e NH_3 .

Tabela 5.124 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado e fluido R134a utilizando o novo método.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	16.420,16	325,36
Condensador	5.229,020	82.932,25	1.885,97
Bomba	-	432,88	36,38
Aquecedor fechado	562,424	8.920,04	288,26
R134a	-	3.222,50	-
Total	6.840,109	125.337,16	288,98²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo..

Tabela 5.125 – Área, massa e taxa de energia para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado e fluido NH_3 utilizando o novo método.

Equipamento	Área (m²)	Massa (kg)	Taxa de energia (kW)
Evaporador	1.048,665	16.631,83	2.381,00
Turbinas ¹	-	11.625,44	346,25
Condensador	5.611,087	88.991,85	2.023,77
Bomba	-	212,01	17,90
Aquecedor fechado	86,275	1.368,32	44,76
NH_3	-	2.281,52	-
Total	6.746,027	118.829,45	328,35²

(1) Potência total das turbinas.

(2) Potência líquida do ciclo.

5.5.4.2 – Fase de construção

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.126) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para a fabricação dos componentes metálicos, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), material que constitui os equipamentos utilizados no ciclo (aço) conforme a Tab. (4.1), a massa dos equipamentos apresentada na Tab. (5.124) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.125) obtém-se a Tab. (5.127).

Tabela 5.126 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluído R134a referente a fase de construção utilizando o novo método.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Ar (t) ¹	$1,46 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,51 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,17 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,17 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,08 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,08 \cdot 10^{15}$
Titânio magnetita de Vanádio (t) ¹		$1,58 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,70 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,67 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,84 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,63 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,25 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,19 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,12 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,70 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,36 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$3,13 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,32 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$7,13 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,55 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,52 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$3,03 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$1,05 \cdot 10^{-2}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,84 \cdot 10^{13}$
Cimiritó (t) ¹				$6,51 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,51 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,85 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$4,18 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,34 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,42 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,85 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$5,00 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,62 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,73 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,26 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,79 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,76 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,76 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,36 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,34 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,26 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,79 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,61 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,69 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$3,14 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,68 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$) ¹				$2,26 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,18 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$) ¹				$2,86 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,49 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,25 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.127 – Índices emergéticos do aço para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH_3 referente a fase de construção utilizando o novo método.

Fase de Construção – Equipamentos do ciclo ORC							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Ar (t) ¹	$1,38 \cdot 10^1$					$5,16 \cdot 10^{13}$	$7,12 \cdot 10^{14}$
Calcário (t) ¹		$3,00 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,00 \cdot 10^{15}$
Mina de Alumínio (t) ¹		$1,02 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$1,02 \cdot 10^{15}$
Titâniomagnetita de Vanádio (t) ¹		$1,50 \cdot 10^1$				$4,24 \cdot 10^{15}$	$6,35 \cdot 10^{16}$
Ilmenita (t) ¹		$3,48 \cdot 10^{-1}$				$1,86 \cdot 10^{16}$	$6,48 \cdot 10^{15}$
Minério de ferro (t) ¹		$2,50 \cdot 10^1$				$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,13 \cdot 10^{16}$
Água doce (t) ¹			$3,02 \cdot 10^2$			$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,01 \cdot 10^{14}$
Elettricidade Hidráulica (t) ¹			$1,61 \cdot 10^{11}$			$8,00 \cdot 10^4$	$1,29 \cdot 10^{16}$
Semi coque (t) ¹				$2,97 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$3,14 \cdot 10^{15}$
Coque (t) ¹				$6,76 \cdot 10^{11}$		$1,06 \cdot 10^4$	$7,16 \cdot 10^{15}$
Sílica (t) ¹				$2,39 \cdot 10^1$		$1,20 \cdot 10^{14}$	$2,87 \cdot 10^{15}$
Fluorita (t) ¹				$9,93 \cdot 10^{-3}$		$2,71 \cdot 10^{15}$	$2,69 \cdot 10^{13}$
Ciminito (t) ¹				$6,17 \cdot 10^0$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,17 \cdot 10^{15}$
Aço de corte (t) ¹				$9,34 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$3,96 \cdot 10^{15}$
Escória de corte (t) ¹				$3,17 \cdot 10^{-1}$		$4,24 \cdot 10^{15}$	$1,34 \cdot 10^{15}$
Escala de óxido (t) ¹				$5,55 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$4,74 \cdot 10^{14}$
Alumínio (t) ¹				$7,23 \cdot 10^{-1}$		$3,58 \cdot 10^{15}$	$2,59 \cdot 10^{15}$
Ferro em pó (t) ¹				$3,09 \cdot 10^1$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,64 \cdot 10^{16}$
Bentonita (t) ¹				$3,57 \cdot 10^{-1}$		$1,00 \cdot 10^{15}$	$3,57 \cdot 10^{14}$
Carvão (t) ¹				$3,19 \cdot 10^{11}$		$3,98 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^{16}$
Lingote de ferro (t) ¹				$3,09 \cdot 10^{-1}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,64 \cdot 10^{14}$
Ferrosilício (t) ¹				$9,11 \cdot 10^{-3}$		$4,88 \cdot 10^{14}$	$4,44 \cdot 10^{12}$
Ferro-liga (t) ¹				$2,97 \cdot 10^{-2}$		$8,55 \cdot 10^{14}$	$2,54 \cdot 10^{13}$
Casa de máquinas (\$)¹				$2,14 \cdot 10^3$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,12 \cdot 10^{16}$
Serviço e Trabalho (\$)¹				$2,71 \cdot 10^4$		$5,20 \cdot 10^{12}$	$1,41 \cdot 10^{17}$
Aço (t) ¹					$1,19 \cdot 10^2$	$2,77 \cdot 10^{15}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Para o fluido de trabalho, seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.1) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.128) para o ciclo com R134a contendo a relação de cada insumo utilizado na fabricação do fluido R134a assim como suas respectivas transformadas e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Contabilização dos insumos utilizados nesta fase conforme a Tab. (3.1), a massa do fluido de trabalho apresentada na Tab. (5.124) para o fluido R134a e o equacionamento da transformada do produto (T_r) presente na Tab. (3.2).

O mesmo procedimento é válido para os fluido NH_3 onde, através da Tab. (5.125) obtém-se a Tab. (5.129).

Tabela 5.128 – Índices emergéticos do R134a para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção utilizando o novo método.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$8,06 \cdot 10^1$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$5,35 \cdot 10^{13}$
Fluorspar (t) ¹		$1,26 \cdot 10^0$				$2,72 \cdot 10^{15}$	$3,42 \cdot 10^{15}$
Óleo Cru (J) ¹		$4,83 \cdot 10^{-1}$				$5,40 \cdot 10^4$	$2,61 \cdot 10^4$
Gás Natural (J) ¹		$5,48 \cdot 10^{-1}$				$4,80 \cdot 10^4$	$2,63 \cdot 10^4$
Calcário (t) ¹		$6,77 \cdot 10^{-1}$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$6,77 \cdot 10^{14}$
Enxofre (t) ¹		$5,16 \cdot 10^{-1}$				$8,60 \cdot 10^{14}$	$4,43 \cdot 10^{14}$
Cloreto de Sódio (t) ¹		$9,99 \cdot 10^0$				$1,00 \cdot 10^{15}$	$9,99 \cdot 10^{15}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,61 \cdot 10^0$			$4,05 \cdot 10^{16}$	$6,53 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$1,39 \cdot 10^{10}$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,63 \cdot 10^{15}$
Calor (J) ¹				$9,02 \cdot 10^{10}$		$6,07 \cdot 10^4$	$5,48 \cdot 10^{15}$
R134a (t) ¹					$3,22 \cdot 10^0$	$2,70 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.129 – Índices emergéticos do NH₃ para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado referente a fase de construção utilizando o novo método.

Fase de Construção – Fluido de Trabalho							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Água (t) ¹	$3,63 \cdot 10^0$					$6,64 \cdot 10^{11}$	$2,41 \cdot 10^{12}$
Nitrogênio (t) ¹			$1,88 \cdot 10^0$			$4,06 \cdot 10^{16}$	$7,60 \cdot 10^{16}$
Eletricidade do							
Carvão (J) ¹				$9,03 \cdot 10^7$		$1,17 \cdot 10^5$	$1,06 \cdot 10^{13}$
NH ₃ (t) ¹					$2,28 \cdot 10^0$	$3,33 \cdot 10^{16}$	

(1) Dados dos componentes adaptado de Bicer *et al.* (2016) e da transformada adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.4.3 – Fase de operação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.2) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.130) para o ciclo com R134a contendo os insumos necessários para manter o sistema de geração de energia operante, assim como suas respectivas transformadas e energia com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e taxas de energia do condensador e do evaporador apresentadas na Tab. (5.124).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH_3 onde, através da Tab. (5.125) obtém-se a Tab. (5.131).

Tabela 5.130 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o R134a referente a fase de operação utilizando o novo método.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$9,51 \cdot 10^{14}$					$9,63 \cdot 10^2$	$9,15 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹	$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.131 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o NH_3 referente a fase de operação utilizando o novo método.

Fase de Operação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Emergia (sej)
Absorção do calor liberado (J) ¹	$1,02 \cdot 10^{15}$					$9,63 \cdot 10^2$	$9,82 \cdot 10^{17}$
Calor residual (J) ¹	$1,20 \cdot 10^{15}$					$4,46 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^{19}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.4.4 – Fase de desativação

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.3) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.132) para o ciclo com R134a contendo a energia consumida necessária para o descarte dos equipamentos do ciclo, assim como sua respectiva transformada e emergia com o auxílio dos seguintes dados: Média do consumo de Diesel como sendo 2.423 [MJ/(kt.km)], distância de 200 km entre o local de operação e o local de destinação dos equipamentos e massa total do ciclo na Tab. (5.124).

O mesmo procedimento é válido para os fluído NH_3 onde, através da Tab. (5.125) obtém-se a Tab. (5.133).

Tabela 5.132 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluído R134a referente a fase de operação utilizando o novo método.

Fase de Desativação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$6,23 \cdot 10^{10}$	$6,60 \cdot 10^4$	$4,11 \cdot 10^{15}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

Tabela 5.133 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluído NH₃ referente a fase de operação utilizando o novo método.

Fase de Desativação							
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit)	Energia (sej)
Diesel para Transporte (J) ¹					$5,87 \cdot 10^9$	$6,60 \cdot 10^4$	$3,87 \cdot 10^{14}$

(1) Dados adaptados de Zhang *et al.* (2018).

5.5.4.5 – Produto Final

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.4) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.134) para o ciclo com R134a contendo o produto final (energia elétrica) com o auxílio dos seguintes dados: Tempo de operação do ciclo de vida do sistema apresentado na Tab. (4.1) e a potência líquida do ciclo apresentada na Tab. (5.124). Para obtenção da transformada do produto (T_r) foi utilizada a equação presente na Tab. (3.2) e os dados da última coluna das tabelas Tab. (5.126), Tab. (5.128), Tab. (5.130) e Tab. (5.132).

O mesmo procedimento é válido para o fluído NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.125), Tab. (5.127), Tab. (5.129), Tab. (5.131) e Tab. (5.133), obtêm-se a Tab. (5.135).

Tabela 5.134 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o R134a referente ao produto do ciclo utilizando o novo método.

PRODUTO						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Emergia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,46 \cdot 10^{14}$	$3,77 \cdot 10^5$

Tabela 5.135 – Índices emergéticos para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o NH₃ referente ao produto do ciclo utilizando o novo método.

PRODUTO						
Componentes (unidade)	R	N	F_r	F_n	P	T_r (sej/unit) Emergia (sej)
ELETRICIDADE (J)					$1,65 \cdot 10^{14}$	$3,32 \cdot 10^5$

5.5.4.6 – Índices Emergéticos derivados

Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Seção (5.3.1.5) mas agora para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado, foi possível obter a Tab. (5.136) para o ciclo com R134a contendo o somatório dos índices emergéticos básicos com o auxílio das seguintes tabelas: Tab. (5.126), Tab. (5.128), Tab. (5.130), Tab. (5.132) e Tab. (5.134).

O mesmo procedimento é válido para o fluido NH₃ onde, através das tabelas Tab. (5.127), Tab. (5.129), Tab. (5.131), Tab. (5.133) e Tab. (5.135), obtêm-se a Tab. (5.137).

Tabela 5.136 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de emergia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido R134a utilizando o novo método.

R	N	F_r	F_n
$9,16 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$7,91 \cdot 10^{16}$	$2,43 \cdot 10^{17}$

Tabela 5.137 – Somatório dos índices emergéticos básicos em termos de energia [sej] para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH_3 utilizando o novo método.

R	N	F_r	F_n
$9,83 \cdot 10^{17}$	$5,36 \cdot 10^{19}$	$8,91 \cdot 10^{16}$	$2,24 \cdot 10^{17}$

Com os dados da Tab. (5.136) para o ciclo com o R134a e Tab. (5.137) para o NH_3 , juntamente com o equacionamento apresentado na Tab. (3.2), pode-se calcular os índices emergéticos derivados. Os resultados dos índices emergéticos derivados podem ser visualizados na Tab. (5.138) e Tab. (5.139) para o R134a e NH_3 respectivamente.

Tabela 5.138 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido R134a utilizando o novo método.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,77 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,70 \cdot 10^5$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,41 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,90 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,15

Tabela 5.139 – Índices emergéticos derivados para o ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado com o fluido NH_3 utilizando o novo método.

Índices	Símbolo	Resultado
Rendimento	Y	$5,49 \cdot 10^{19}$
Transformada do produto	T_r	$3,32 \cdot 10^5$
Taxa de rendimento emergético	EYR	$1,76 \cdot 10^2$
Taxa de carregamento ambiental	ELR	$5,02 \cdot 10^1$
Taxa de investimento ambiental	EIR	$5,73 \cdot 10^{-3}$
Índice emergético de sustentabilidade	EIS	3,50

Utilizando as Considerações 2 e 3 apresentadas na Seção (5.5), foi possível obter um (*EIS*) menor em relação ao obtido na Seção (5.3.4) mudando de 3,64 para 3,15 conforme Tab. (5.138). O valor obtido também é menor que o (*EIS*) referente ao ciclo reversível regenerativo, que de acordo com a Tab. (5.73) era de 3,56. Isso mostra que as Considerações 2 e 3 representaram fisicamente as distinções entre esses ciclos devido a presença ou não de irreversibilidades a partir da criação de um parâmetro em comum para base de comparação entre os índices emergéticos, sendo eles: Taxa de transferência de calor no condensador calculada de acordo com a primeira lei da termodinâmica considerando o ciclo todo como volume de controle e potências avaliadas sem irreversibilidade para o cálculo das massas da turbina(s), bomba e fluido de trabalho.

Já para o fluido NH_3 , a redução obtida em relação a Seção (5.3.4) para o (*EIS*) foi de 3,51 para 3,50 como pode ser visualizado na Tab. (5.139). Este valor também ficou igual em relação ao ciclo reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado que, segundo a Tab. (5.73) foi de 3,50 mostrando também que, ao se criar uma base igual de comparação entre os dois tipos de ciclos (reversível e irreversível) o índice emergético de sustentabilidade segue a tendência da eficiência térmica quando comparamos ciclos com ou sem irreversibilidades, ou seja: Ciclos reversíveis possuem eficiência térmica maior e índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) maior ou igual em comparação ao mesmo ciclo com presença de irreversibilidades.

5.6 – COMPARAÇÕES ENTRE OS CICLOS

A partir dos resultados obtidos neste capítulo, foi possível construir a Tab. (5.140) contendo os dados de potência e eficiência térmica dos ciclos termodinâmicos, massa do sistema e do fluido de trabalho bem como o índice emergético de sustentabilidade, conforme apresentado abaixo.

Ao analisar os dados da Tab. (5.140) foi possível verificar a mesma tendência observada na Tab. (5.73) em que, o índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) diminui na medida em que outros componentes são adicionados ao ciclo ORC para melhorar sua eficiência térmica, conforme decaimento entre os valores dos ciclos básicos (reversível e irreversível) e os ciclos regenerativos.

Já a diferença entre os índices (*EIS*) que havia sido observada nos ciclos ORC reversíveis e irreversíveis e separadamente entre os ciclos regenerativos reversíveis e irreversíveis, com o novo método utilizando as Considerações 2 e 3 da Seção (5.5),

ocorreu conforme o esperado, ou seja, o índice emergético de sustentabilidade diminuiu a medida em que irreversibilidades foram acrescentadas ao sistema de modo que, mais recursos são necessárias para suprir essas ineficiências e manter o ciclo operante dentro dos seus requisitos de operação.

Tabela 5.140 – Comparação dos dados termodinâmicos e emergéticos para os diferentes ciclos ORC e seus respectivos fluidos de trabalho com o novo método para os ciclos irreversíveis.

Ciclos ORC	<i>EIS</i>	$\dot{W}_{ciclo}$ [kW]	η [%]	Massa de fluido [kg]	Massa dos componentes [kg]
Reversível R134a	3,92	303,40	12,74	2.026,02	116.060,59
Reversível NH ₃	3,67	343,88	14,44	2.193,64	114.898,70
Irreversível R134a	3,91	249,31	10,47	2.030,24	116.085,23
Irreversível NH ₃	3,63	228,02	12,10	2.196,02	114.931,75
Reversível aquecedor fechado R134a	3,56	321,70	13,51	2.160,51	127.640,94
Reversível aquecedor fechado NH ₃	3,50	356,85	14,99	2.279,23	118.847,49
Irreversível aquecedor fechado R134a	3,15	288,98	12,14	3.222,50	125.337,16
Irreversível aquecedor fechado NH ₃	3,50	328,35	13,79	2.281,52	118.829,45

5.6.1 – Proporção entre fluido de trabalho e componentes do ciclo

A partir dos dados das massas e energia dos fluídos de trabalho e dos componentes dos ciclos foi possível realizar uma comparação entre os termos de massa e energia, relacionando o fluido de trabalho e os componentes metálicos (aço) para todos os ciclos estudados.

Os dados contendo as massas tanto do fluído de trabalho quando dos componentes fabricados em aço, assim como a representatividade da massa do fluído na massa total do ciclo podem ser visualizados na Tab. (5.141). Os dados para a massa do ciclo reversível com R134a foram retirados da Tab. (5.9), Tab. (5.10) para o ciclo reversível utilizando a NH₃, Tab. (5.108) para o ciclo irreversível com R134a, Tab. (5.109) para o ciclo irreversível com NH₃, Tab. (5.13) para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando o R134a, Tab. (5.14) para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando a NH₃, Tab. (5.124) para o

ciclo irreversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando o R134a e Tab. (5.125) para o ciclo irreversível com aquecedor fechado utilizando a NH_3 .

Tabela 5.141 – Comparação entre a massa do fluído de trabalho com a massa dos componentes dos ciclos ORC.

Ciclos ORC	Massa de fluído [kg]	Massa dos componentes [kg]	Representatividade do fluído (%)
Reversível R134a	2.026,20	116.060,59	1,75
Reversível NH_3	2.193,64	114.898,70	1,91
Irreversível R134a	2030,24	116.085,53	1,75
Irreversível NH_3	2.196,02	114.931,75	1,91
Reversível aquecedor fechado R134a	2.160,51	127.640,94	1,69
Reversível aquecedor fechado NH_3	2.279,23	118.847,49	1,92
Irreversível aquecedor fechado R134a	3.222,50	125.337,16	2,57
Irreversível aquecedor fechado NH_3	2.281,52	118.829,45	1,92

Já a Tab. (5.142) apresenta as energias tanto do fluído de trabalho quanto dos componentes fabricados em aço e a representatividade da energia do fluído na energia total do ciclo. Para sintetizar a Tab. (5.142), os dados de energia para o ciclo reversível com R134a vieram da Tab. (5.17) para a energia dos elementos metálicos e a Tab. (5.19) para a energia do fluído de trabalho. Já para o fluído NH_3 Tab. (5.18) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.20) para a energia do fluído de trabalho. Para o ciclo irreversível com R134a Tab. (5.110) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.112) para a energia do fluído de trabalho, enquanto para o ciclo irreversível com NH_3 Tab. (5.111) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.113) para a energia do fluído de trabalho. Para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando o R134a Tab. (5.45) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.47) para a energia do fluído de trabalho, enquanto para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando NH_3 Tab. (5.46) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.48) para a energia do fluído de trabalho. Por fim, para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando o R134a Tab. (5.126) para a energia dos elementos metálicos e Tab. (5.128) para a energia do fluído de trabalho, enquanto para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor

fechado utilizando NH_3 Tab. (5.127) para a emerggia dos elementos metálicos e Tab. (5.129) para a emerggia do fluído de trabalho.

Tabela 5.142 – Comparação entre a emerggia do fluído de trabalho com a emerggia dos componentes de aço dos ciclos ORC.

Ciclos ORC	Emergia fluído [sej]	Emergia componentes [sej]	Representatividade do fluído (%)
Reversível R134a	$5,47 \cdot 10^{16}$	$3,21 \cdot 10^{17}$	15
Reversível NH_3	$7,31 \cdot 10^{16}$	$3,18 \cdot 10^{17}$	19
Irreversível R134a	$5,48 \cdot 10^{16}$	$3,21 \cdot 10^{17}$	15
Irreversível NH_3	$7,32 \cdot 10^{16}$	$3,18 \cdot 10^{17}$	19
Reversível aquecedor fechado R134a	$5,83 \cdot 10^{16}$	$3,53 \cdot 10^{17}$	14
Reversível aquecedor fechado NH_3	$7,60 \cdot 10^{16}$	$3,29 \cdot 10^{17}$	19
Irreversível aquecedor fechado R134a	$8,69 \cdot 10^{16}$	$3,47 \cdot 10^{17}$	20
Irreversível aquecedor fechado NH_3	$7,61 \cdot 10^{16}$	$3,29 \cdot 10^{17}$	19

Pode-se verificar na Tab. (5.141) que em termos de massa (kg), o fluído de trabalho representa em torno de 2% apenas da massa total utilizada na fabricação dos componentes dos ciclos abordados. Entretanto, ao comparar com os dados em termos de emerggia conforme apresentado na Tab. (5.142), o fluído de trabalho torna-se mais representativo, entre 14% e 20% dependendo do fluído e do ciclo, tornando-o deste modo não desprezível, ou seja, em uma análise de ciclo ORC o fluído de trabalho precisa ser contabilizado e não pode ser desconsiderado.

5.6.2 – Proporção entre índices emerggéticos básicos

A partir dos dados obtidos na Seção (5.3) e (5.5) foi possível levantar a proporção entre os índices emerggéticos básicos apresentados na Tab. (3.1), que são utilizados durante as três fases que compõe o ciclo ORC (construção, operação e desativação) convertidos em termos percentuais em relação ao somatório desses índices de modo que ,esses dados podem ser visualizados na Tab. (5.143).

Os índices emerggéticos básicos que compõe a Tab. (5.143) foram retirados da Tab. (5.27) para o ciclo reversível com R134a, Tab. (5.28) para o ciclo reversível com NH_3 , Tab. (5.120) para o ciclo irreversível com R134a, Tab. (5.121) para o ciclo

irreversível com NH_3 , Tab. (5.55) para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado e R134a, Tab. (5.56) para o ciclo reversível regenerativo com aquecedor fechado e NH_3 , Tab. (5.136) para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando R134a e Tab. (5.137) para o ciclo irreversível regenerativo com aquecedor fechado utilizando NH_3 .

A partir dos dados apresentados na Tab. (5.143) pode-se verificar que os elementos não renováveis representam a esmagadora maioria dos recursos utilizados para a construção, operação e desativação dos ciclos ORC. Este índice leva a cargas ambientais maiores (*ELR*) e consequentemente a índices emergéticos de sustentabilidade (*EIS*) menores. A partir disto, com o intuito de se melhorar a sustentabilidade da utilização dos ciclos ORC, novas alternativas para materiais que se enquadram na classificação de recursos não renováveis (*N*) podem ser estudados e implementados a fim de aumentar a sustentabilidade do sistema para médios e longos períodos.

Tabela 5.143 – Comparação entre os índices emergéticos básicos dos ciclos ORC.

Ciclos ORC	<i>R</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>F_r</i> (%)	<i>F_n</i> (%)
Reversível R134a	1,84	97,66	0,10	0,41
Reversível NH_3	1,80	97,65	0,16	0,39
Irreversível R134a	1,84	97,66	0,10	0,41
Irreversível NH_3	1,80	97,65	0,16	0,39
Reversível aquecedor fechado R134a	1,82	97,63	0,11	0,45
Reversível aquecedor fechado NH_3	1,79	97,64	0,16	0,41
Irreversível aquecedor fechado R134a	1,67	97,74	0,14	0,44
Irreversível aquecedor fechado NH_3	1,79	97,64	0,16	0,41

5.7 – COMPARAÇÃO COM OUTROS SISTEMAS

O trabalho de Zhang *et al.* (2018) fornece índices emergéticos derivados presentes na Tab. (3.2) para outros sistemas de geração de energia, dentre elas: eólica, geotérmica, hidroelétrica e proveniente da queima de combustíveis fósseis como metano, óleo e carvão. Esses dados juntamente com os dados obtidos na Seção (5.3) e (5.5) podem ser visualizados na Tab. (5.144).

A partir dos dados apresentados na Tab. (5.144) é possível verificar que o índice emergético de sustentabilidade para os ciclos ORC são menores em comparação aos sistemas provenientes de fontes renováveis como por exemplo eólica e geotérmica, entretanto se compará-los com as fontes derivadas de petróleo (todas com *EIS* menor do que um, ou seja, sustentável em um curto período) os ciclos ORC se apresentam mais eficientes em termos de sustentabilidade, mostrando-se apto para substituir essas fontes poluentes.

Tabela 5.144 – Comparação dos índices emergéticos derivados para os diferentes ciclos ORC e outros seis sistemas de geração de potência, conforme Zhang *et al.* (2018).

	T_r	<i>EYR</i>	<i>ELR</i>	<i>EIS</i>
Eólica	$5,89 \cdot 10^4$	7,47	0,15	48,30
Geotérmica	$1,42 \cdot 10^5$	4,81	0,44	11,05
Hidroelétrica	$5,87 \cdot 10^4$	7,65	0,45	16,90
Metano	$1,60 \cdot 10^4$	6,60	11,78	0,56
Óleo	$1,87 \cdot 10^5$	4,21	14,24	0,30
Carvão	$1,62 \cdot 10^5$	5,48	10,37	0,53
Reversível R134a	$3,59 \cdot 10^5$	198,43	50,66	3,92
Reversível NH ₃	$3,17 \cdot 10^5$	183,91	50,06	3,67
Irreversível R134a	$4,37 \cdot 10^5$	198,32	50,67	3,91
Irreversível NH ₃	$3,78 \cdot 10^5$	181,69	50,07	3,63
Reversível aquecedor fechado R134a	$3,39 \cdot 10^5$	181,42	50,92	3,56
Reversível aquecedor fechado NH ₃	$3,05 \cdot 10^5$	175,57	50,22	3,50
Irreversível aquecedor fechado R134a	$3,77 \cdot 10^5$	170,36	54,14	3,15
Irreversível aquecedor fechado NH ₃	$3,32 \cdot 10^5$	175,54	50,22	3,50

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E EXTENSÕES

Neste estudo foi realizada uma análise de sustentabilidade ambiental para diferentes ciclos orgânicos de Rankine (ORC) utilizando diferentes fluidos de trabalho orgânicos. A partir dos resultados obtidos no Cap. (5) foi possível gerar as seguintes conclusões:

1. A análise de emergência pode ser utilizada como um método adicional para seleção de um sistema ORC em vista que, ela leva em consideração não apenas o desempenho termodinâmico como também o impacto ambiental da utilização do sistema de geração de energia.

2. O índice (*EIS*) para os ciclos ORC são menores em relação aos sistemas de geração de energia renováveis, entretanto são maiores que os sistemas não renováveis (derivados de petróleo) como pode ser visualizado na Tab. (5.144). Deste modo os sistemas ORC são uma melhor opção em termos de sustentabilidade emergética em relação aos ciclos de potência movidos a derivados de petróleo.

3. O índice (*EYR*) para os ciclos ORC são maiores em relação aos outros tipos de geração de energia conforme apresentado na Tab. (5.144). Este resultado demonstra que os sistemas ORC possuem uma maior capacidade para explorar e tornar disponível os recursos locais investindo em recursos externos, conforme definição do índice apresentado no trabalho de Liang *et al.* (2016).

4. Os recursos não renováveis representam uma grande parcela dos insumos utilizados na fase de construção do ciclo ORC (faixa de 97%) conforme pode ser observado na Tab. (5.143) da Seção (5.6.2). Reduzir a utilização desse tipo de recurso diminuirá o índice (*ELR*) e consequentemente aumentará o índice (*EIS*), tornando o sistema cada vez mais sustentável.

5. O índice (*ELR*) para os ciclos ORC são maiores em relação a todos os outros tipos de sistema de geração de energia que são apresentados na Tab. (5.144). Este índice é dado pela divisão entre os índices emergéticos básicos não renováveis e renováveis,

ou seja, os materiais utilizados na fabricação dos componentes do ciclo e na operação do ciclo são compostos em sua grande maioria por recursos não renováveis, causando assim maior impacto ambiental para sua obtenção e utilização em comparação aos demais sistemas. É importante selecionar um sistema com baixo (*ELR*), obtendo assim um menor carregamento ambiental.

6. Segundo a Tab. (5.141) apresentada na Seção (5.6.1), o fluido de trabalho representa em termos de massa 2% da massa total do sistema ORC. Analisando este dado, a princípio o fluido de trabalho pode ser desconsiderado devido ao seu valor em massa (kg) possuir um pequeno grau de significância em comparação a massa total do conjunto do sistema. Entretanto, ao analisarmos a representatividade do fluido de trabalho em termos emergéticos, sua parcela passa a ser de 14% a 20% da energia total do sistema conforme visualizado na Tab. (5.142), ou seja, em termos emergéticos o fluido de trabalho não pode ser desprezado na análise de energia e deve ser contabilizado nos cálculos emergéticos.

7. Os resultados apresentados na Tab. (5.140) indicam que um bom desempenho termodinâmico (eficiência térmica elevada) não garante um bom desempenho emergético. Verificou-se que o índice emergético de sustentabilidade (*EIS*) diminui na medida em que outros componentes são adicionados ao ciclo ORC para melhorar sua eficiência térmica. Como a análise emergética leva em consideração todos os insumos necessários para a fabricação e operação dos componentes do sistema de geração de potência, aumentar a massa do sistema acarreta em um aumento da taxa de carregamento ambiental (*ELR*) e consequentemente na diminuição do índice emergético de sustentabilidade (*EIS*), tornando o sistema mais distante de uma classificação de sustentabilidade para longo prazo.

8. O método para o cálculo de massas para as turbinas, bombas e fluidos de trabalho propostos por Zhang *et al* (2018) não levam em consideração as irreversibilidades do sistema conforme foi constatado na Seção (5.4), levando a resultados fisicamente contraditórios onde os ciclos irreversíveis seriam mais sustentáveis em termos de (*EIS*) conforme Tab. (5.73). Um novo modelo foi proposto na Seção (5.5) de modo que, de acordo com a Tab. (5.140), o novo método utilizando as potências do sistema sem irreversibilidade para o dimensionamento desses componentes e calculando a taxa de transferência do condensador a partir da aplicação da primeira lei da termodinâmica considerando todo o ciclo no volume de controle, as Considerações 2 e 3 apresentadas na Seção (5.5) corrigiram essa deficiência apresentando índices

energéticos de sustentabilidade menores ou iguais para os ciclos irreversíveis em comparação ao ciclo similar reversível.

Segundo as conclusões apresentadas, foi verificado que a análise emergética contribui para uma análise mais ampla de ciclos ORC, sendo neste estudo aplicada de forma inédita para ciclos ORC irreversíveis e regenerativos com aquecedor de alimentação fechado.

A partir disto, a análise emergética poderia ser aplicada a outros fluídos de trabalho para que, a partir de um ranqueamento, seja possível verificar qual fluído de trabalho possui um comportamento mais sustentável por um longo prazo em termos de (*EIS*). É possível não apenas expandir a análise para outros fluídos, mas também para outros tipos de sistemas de geração de potência a vapor, com o intuito de verificar o seu comportamento emergético e compará-lo com os sistemas já apresentados na literatura, acrescentando ainda mais alternativas para a escolha de um sistema mais otimizado, não só em termos energéticos mas também emergéticos. Outro ponto que poderia ser analisado consisti na busca por materiais mais renováveis em substituição aos não renováveis utilizados na composição dos componentes do ciclo (equipamentos e fluído de trabalho) apresentados neste estudo, com o intuito de reduzir o (*ELR*) do sistema e consequentemente aumentar o (*EIS*) a fim de torna-lo sustentável em termos energéticos por um período mais longo. Como a análise emergética está começando a ser utilizada em análises de engenharia, não há muitas publicações relacionadas a este tipo de aplicação de modo que, esta pesquisa se apresenta como uma contribuição para a literatura relacionando a análise emergética com sistemas de geração de potência a vapor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHBASHLO, Mortaza; ROSEN, Marc A. Consolidating exergoeconomic and exergoenvironmental analyses using the emergy concept for better understanding energy conversion systems. *Journal of cleaner production*, v. 172, p. 696-708, 2018.

BANKS, R. E. et al. Environmental aspects of fluorinated materials: part 31: comparative life-cycle assessment of the impacts associated with fire extinguishants HFC-227ea and IG-541. *Process safety and environmental protection*, v. 76, n. 3, p. 229-238, 1998.

BERTON, Leon P. *Chemical Engineering Research Trends*. Nova Publishers, 2007.

BICER, Yusuf et al. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1379-1395, 2016.

BROWN, Mark T.; RAUGEI, Marco; ULGIATI, Sergio. On boundaries and ‘investments’ in emergy synthesis and LCA: a case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, v. 15, n. 1, p. 227-235, 2012.

BUFI, Elio Antonio; CAMPOREALE, Sergio Mario; CINNELLA, Paola. Robust optimization of an Organic Rankine Cycle for heavy duty engine waste heat recovery. *Energy Procedia*, v. 129, p. 66-73, 2017.

CHEN, Huijuan; GOSWAMI, D. Yogi; STEFANAKOS, Elias K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 9, p. 3059-3067, 2010.

DEL RIO OLIVEIRA, Santiago; MILANEZ, Luiz Fernando. Equivalence between the application of entransy and entropy generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 79, p. 518-525, 2014.

DING, Yang et al. Exergoenvironmental model of Organic Rankine Cycle system including the manufacture and leakage of working fluid. *Energy*, v. 145, p. 52-64, 2018.

EYERER, Sebastian et al. Experimental study of an ORC (Organic Rankine Cycle) and analysis of R1233zd-E as a drop-in replacement for R245fa for low temperature heat utilization. *Energy*, v. 103, p. 660-671, 2016.

GERBINET, Saïcha; BELBOOM, Sandra; LÉONARD, Angélique. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 747-753, 2014.

GUO, Zeng-Yuan; ZHU, Hong-Ye; LIANG, Xin-Gang. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 50, n. 13-14, p. 2545-2556, 2007.

HAJABDOLLAHI, Zahra et al. Thermo-economic environmental optimization of Organic Rankine Cycle for diesel waste heat recovery. *Energy*, v. 63, p. 142-151, 2013.

HEBERLE, Florian; SCHIFFLECHNER, Christopher; BRÜGGEMANN, Dieter. Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working fluids. *Geothermics*, v. 64, p. 392-400, 2016.

LI, You-Rong; WANG, Jian-Ning; DU, Mei-Tang. Influence of coupled pinch point temperature difference and evaporation temperature on performance of organic Rankine cycle. *Energy*, v. 42, n. 1, p. 503-509, 2012.

LIANG, Hanwei et al. Is the hydrogen production from biomass technology really sustainable? Answer by life cycle emergy analysis. *international journal of hydrogen energy*, v. 41, n. 25, p. 10507-10514, 2016.

LIU, Wei et al. Investigation of hydrofluoroolefins as potential working fluids in organic Rankine cycle for geothermal power generation. *Energy*, v. 67, p. 106-116, 2014.

MCCULLOCH, A.; LINDLEY, A. A. From mine to refrigeration: a life cycle inventory analysis of the production of HFC-134a. *International Journal of Refrigeration*, v. 26, n. 8, p. 865-872, 2003.

MERLIN, G.; BOILEAU, H. Eco-efficiency and entropy generation evaluation based on emergy analysis: Application to two small biogas plants. *Journal of cleaner production*, v. 143, p. 257-268, 2017.

MOKYR, Joel. The second industrial revolution, 1870-1914. *Storia dell'economia Mondiale*, v. 21945, 1998.

ODUM, Howard T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making. New York: Wiley, 1996.

PAN, Hengyu et al. Emergy evaluation of an industrial park in Sichuan Province, China: a modified emergy approach and its application. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 105-118, 2016.

SALEH, Bahaa et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, v. 32, n. 7, p. 1210-1221, 2007.

SHA, Sha; HURME, Markku. Emergy evaluation of combined heat and power plant processes. *Applied thermal engineering*, v. 43, p. 67-74, 2012.

SHAPIRO, Howard N.; MORAN, Michael J. Princípios de termodinâmica para engenharia. LTC, Ed, v. 8, 2018.

TSATSARONIS, Georgios; WINHOLD, Michael. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants—I. A new general methodology. *Energy*, v. 10, n. 1, p. 69-80, 1985.

UUSITALO, Antti et al. Thermodynamic evaluation on the effect of working fluid type and fluids critical properties on design and performance of Organic Rankine Cycles. *Journal of cleaner production*, v. 188, p. 253-263, 2018.

WEART, Spencer R. The discovery of the risk of global warming. *Physics Today*, v. 50, n. 1, p. 34-40, 1997.

YANG, Hui et al. Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China. *Biomass and bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 581-589, 2011.

ZHANG, Hualing et al. Emergy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation. *Journal of Cleaner Production*, v. 183, p. 1207-1215, 2018.

ANEXO A

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES para validação do método.

Ciclo ORC reversível – Fluido R134a:

```

T[1]=96,33
P[1]=P_sat(R134a;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])

P[2]=P[3]
s[2]=s[1]
x[2]=Quality(R134a;P=P[2];s=s[2])
T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];x=x[2])
h[2]=Enthalpy(R134a;T=T[2];x=x[2])

T[3]=30
P[3]=P_sat(R134a;T=T[3])
x[3]=0
h[3]=Enthalpy(R134a;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(R134a;T=T[3];x=x[3])

T[4]=32,27
P[4]=P[1]
s[4]=s[3]
h[4]=Enthalpy(R134a;T=T[4];P=P[4])

T[5]=120
P[5]=101,305
h[5]=Enthalpy(Air_ha;T=T[5];P=P[5])
s[5]=Entropy(Air_ha;T=T[5];P=P[5])

P[6]=101,305
T[6]=80
h[6]=Enthalpy(Air_ha;T=T[6];P=P[6])
s[6]=Entropy(Air_ha;T=T[6];P=P[6])

P[7]=101,305
T[7]=20
h[7]=Enthalpy(Air_ha;T=T[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Air_ha;T=T[7];P=P[7])

P[8]=101,305
T[8]=25
h[8]=Enthalpy(Air_ha;T=T[8];P=P[8])
s[8]=Entropy(Air_ha;T=T[8];P=P[8])

```

ANEXO B

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC reversível – Fluido R134a:

```

T[1]=90
P[1]=P_sat(R134a;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])

P[2]=P[3]
s[2]=s[1]
x[2]=Quality(R134a;P=P[2];s=s[2])
T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];x=x[2])
h[2]=Enthalpy(R134a;T=T[2];x=x[2])

T[3]=30
P[3]=P_sat(R134a;T=T[3])
x[3]=0
h[3]=Enthalpy(R134a;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(R134a;T=T[3];x=x[3])
v[3]=Volume(R134a;h=h[3];P=P[3])

s[4]=s[3]
P[4]=P[1]
h[4]=h[3]+((v[3])*(P[4]-P[3]))
T[4]=Temperature(R134a;P=P[4];s=s[4])

T[5]=120
P[5]=101,305
h[5]=Enthalpy(Water;T=T[5];P=P[5])
s[5]=Entropy(Water;T=T[5];P=P[5])

P[6]=101,305
T[6]=80
h[6]=Enthalpy(Water;T=T[6];P=P[6])
s[6]=Entropy(Water;T=T[6];P=P[6])

P[7]=101,305
T[7]=20
h[7]=Enthalpy(Water;T=T[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Water;T=T[7];P=P[7])

P[8]=101,305
T[8]=25
h[8]=Enthalpy(Water;T=T[8];P=P[8])
s[8]=Entropy(Water;T=T[8];P=P[8])

```

ANEXO C

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC reversível – Fluido NH₃:

```

T[1]=90
P[1]=P_sat(Ammonia;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])

P[2]=P[3]
s[2]=s[1]
x[2]=Quality(Ammonia;P=P[2];s=s[2])
T[2]=Temperature(Ammonia;P=P[2];s=s[2])
h[2]=Enthalpy(Ammonia;T=T[2];s=s[2])

T[3]=30
P[3]=P_sat(Ammonia;T=T[3])
x[3]=0
h[3]=Enthalpy(Ammonia;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(Ammonia;T=T[3];x=x[3])
v[3]=Volume(Ammonia;h=h[3];P=P[3])

s[4]=s[3]
P[4]=P[1]
h[4]=h[3]+((v[3])*(P[4]-P[3]))
T[4]=Temperature(Ammonia;P=P[4];s=s[4])

T[5]=120
P[5]=101,305
h[5]=Enthalpy(Water;T=T[5];P=P[5])
s[5]=Entropy(Water;T=T[5];P=P[5])

P[6]=101,305
T[6]=80
h[6]=Enthalpy(Water;T=T[6];P=P[6])
s[6]=Entropy(Water;T=T[6];P=P[6])

P[7]=101,305
T[7]=20
h[7]=Enthalpy(Water;T=T[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Water;T=T[7];P=P[7])

P[8]=101,305
T[8]=25
h[8]=Enthalpy(Water;T=T[8];P=P[8])
s[8]=Entropy(Water;T=T[8];P=P[8])

```

ANEXO D

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC irreversível – Fluido R134a:

9=s2
10=s4
nt=0,85

T[1]=90
P[1]=P_sat(R134a;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])

P[s2]=P[3]
s[s2]=s[1]
x[s2]=Quality(R134a;P=P[s2];s=s[s2])
T[s2]=Temperature(R134a;P=P[s2];x=x[s2])
h[s2]=Enthalpy(R134a;T=T[s2];x=x[s2])

h[2]=(-nt*(h[1]-h[s2]))+h[1]
P[2]=P[s2]
T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];h=h[2])
s[2]=Entropy(R134a;P=P[2];h=h[2])

T[3]=30
P[3]=P_sat(R134a;T=T[3])
x[3]=0
h[3]=Enthalpy(R134a;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(R134a;T=T[3];x=x[3])

s[s4]=s[3]
P[s4]=P[1]
h[s4]=Enthalpy(R134a;s=s[s4];P=P[s4])
T[s4]=Temperature(R134a;P=P[s4];s=s[s4])

h[4]=((h[s4]-h[3])/nt)+h[3]
P[4]=P[s4]
T[4]=Temperature(R134a;P=P[4];h=h[4])
s[4]=Entropy(R134a;P=P[4];h=h[4])

T[5]=120
P[5]=101,305
h[5]=Enthalpy(Water;T=T[5];P=P[5])
s[5]=Entropy(Water;T=T[5];P=P[5])

P[6]=101,305
T[6]=80
h[6]=Enthalpy(Water;T=T[6];P=P[6])
s[6]=Entropy(Water;T=T[6];P=P[6])

P[7]=101,305
T[7]=20
h[7]=Enthalpy(Water;T=T[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Water;T=T[7];P=P[7])

P[8]=101,305
T[8]=25
h[8]=Enthalpy(Water;T=T[8];P=P[8])
s[8]=Entropy(Water;T=T[8];P=P[8])

ANEXO E

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC irreversível – Fluido NH₃:

```

9=s2
10=s4
nt=0,85

T[1]=90
P[1]=P_sat(Ammonia;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])

P[s2]=P[3]
s[s2]=s[1]
x[s2]=Quality(Ammonia;P=P[s2];s=s[s2])
T[s2]=Temperature(Ammonia;P=P[s2];x=x[s2])
h[s2]=Enthalpy(Ammonia;T=T[s2];x=x[s2])

h[2]=(-nt*(h[1]-h[s2]))+h[1]
P[2]=P[s2]
T[2]=Temperature(Ammonia;P=P[2];h=h[2])
s[2]=Entropy(Ammonia;P=P[2];h=h[2])

T[3]=30
P[3]=P_sat(Ammonia;T=T[3])
x[3]=0
h[3]=Enthalpy(Ammonia;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(Ammonia;T=T[3];x=x[3])

s[s4]=s[3]
P[s4]=P[1]
T[s4]=Temperature(Ammonia;P=P[s4];s=s[s4])
h[s4]=Enthalpy(Ammonia;s=s[s4];P=P[s4])

h[4]=((h[s4]-h[3])/nt)+h[3]
P[4]=P[s4]
T[4]=Temperature(Ammonia;P=P[4];h=h[4])
s[4]=Entropy(Ammonia;P=P[4];h=h[4])

T[5]=120
P[5]=101,305
h[5]=Enthalpy(Water;T=T[5];P=P[5])
s[5]=Entropy(Water;T=T[5];P=P[5])

P[6]=101,305
T[6]=80
h[6]=Enthalpy(Water;T=T[6];P=P[6])
s[6]=Entropy(Water;T=T[6];P=P[6])

P[7]=101,305
T[7]=20
h[7]=Enthalpy(Water;T=T[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Water;T=T[7];P=P[7])

P[8]=101,305
T[8]=25
h[8]=Enthalpy(Water;T=T[8];P=P[8])
s[8]=Entropy(Water;T=T[8];P=P[8])

```

ANEXO F

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado – Fluido R134a:

```

T[1]=90
P[1]=P_sat(R134a;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])

s[2]=s[1]
T[2]=50
P[2]=Pressure(R134a;T=T[2];s=s[2])
h[2]=Enthalpy(R134a;T=T[2];s=s[2])

P[3]=P[4]
s[3]=s[1]
T[3]=Temperature(R134a;P=P[3];s=s[3])
h[3]=Enthalpy(R134a;s=s[3];P=P[3])

T[4]=30
P[4]=P_sat(R134a;T=T[4])
x[4]=0
h[4]=Enthalpy(R134a;T=T[4];x=x[4])
s[4]=Entropy(R134a;T=T[4];x=x[4])

P[5]=P[1]
s[5]=s[4]
T[5]=Temperature(R134a;P=P[5];s=s[5])
h[5]=Enthalpy(R134a;s=s[5];P=P[5])

P[6]=P[1]
T[6]=45
x[6]=0
h[6]=h[17]+v[17]*(P[6]-P[17])
s[6]=Entropy(R134a;h=h[6];P=P[6])

17=saturação_ponto_6
P[17]=P_sat(R134a;T=T[6])
h[17]=Enthalpy(R134a;x=x[6];P=P[17])
v[17]=Volume(R134a;x=x[6];P=P[17])

P[7]=P[2]
x[7]=0
T[7]=Temperature(R134a;P=P[7];x=x[7])
h[7]=Enthalpy(R134a;x=x[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(R134a;x=x[7];P=P[7])

P[8]=P[3]
h[8]=h[7]
s[8]=Entropy(R134a;h=h[8];P=P[8])
T[8]=Temperature(R134a;P=P[8];h=h[8])

P[9]=101,305
T[9]=20
h[9]=Enthalpy(Water;T=T[9];P=P[9])
s[9]=Entropy(Water;T=T[9];P=P[9])

P[10]=101,305
T[10]=25
h[10]=Enthalpy(Water;T=T[10];P=P[10])
s[10]=Entropy(Water;T=T[10];P=P[10])

T[11]=120
P[11]=101,305
h[11]=Enthalpy(Water;T=T[11];P=P[11])
s[11]=Entropy(Water;T=T[11];P=P[11])

P[12]=101,305
T[12]=80
h[12]=Enthalpy(Water;T=T[12];P=P[12])
s[12]=Entropy(Water;T=T[12];P=P[12])

16=f
T[f]=(T[5]+T[6])/2
cp[f]=Cp(R134a;T=T[f];P=P[5])

```

ANEXO G

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC reversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado – Fluido NH_3 :

T[1]=90	P[7]=P[2]
P[1]=P_sat(Ammonia;T=T[1])	x[7]=0
x[1]=1	T[7]=Temperature(Ammonia;P=P[7];x=x[7])
h[1]=Enthalpy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])	h[7]=Enthalpy(Ammonia;x=x[7];P=P[7])
s[1]=Entropy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])	s[7]=Entropy(Ammonia;x=x[7];P=P[7])
s[2]=s[1]	P[8]=P[3]
T[2]=50	h[8]=h[7]
P[2]=Pressure(Ammonia;T=T[2];s=s[2])	s[8]=Entropy(Ammonia;h=h[8];P=P[8])
h[2]=Enthalpy(Ammonia;T=T[2];s=s[2])	T[8]=Temperature(Ammonia;P=P[8];h=h[8])
P[3]=P[4]	P[9]=101,305
s[3]=s[1]	T[9]=20
T[3]=Temperature(Ammonia;P=P[3];s=s[3])	h[9]=Enthalpy(Water;T=T[9];P=P[9])
h[3]=Enthalpy(Ammonia;s=s[3];P=P[3])	s[9]=Entropy(Water;T=T[9];P=P[9])
T[4]=30	P[10]=101,305
P[4]=P_sat(Ammonia;T=T[4])	T[10]=25
x[4]=0	h[10]=Enthalpy(Water;T=T[10];P=P[10])
h[4]=Enthalpy(Ammonia;T=T[4];x=x[4])	s[10]=Entropy(Water;T=T[10];P=P[10])
s[4]=Entropy(Ammonia;T=T[4];x=x[4])	
P[5]=P[1]	T[11]=120
s[5]=s[4]	P[11]=101,305
T[5]=Temperature(Ammonia;P=P[5];s=s[5])	h[11]=Enthalpy(Water;T=T[11];P=P[11])
h[5]=Enthalpy(Ammonia;s=s[5];P=P[5])	s[11]=Entropy(Water;T=T[11];P=P[11])
P[6]=P[1]	P[12]=101,305
T[6]=45	T[12]=80
x[6]=0	h[12]=Enthalpy(Water;T=T[12];P=P[12])
h[6]=h[17]+v[17]*(P[6]-P[17])	s[12]=Entropy(Water;T=T[12];P=P[12])
s[6]=Entropy(Ammonia;h=h[6];P=P[6])	
17=saturação_ponto_6	16=f
P[17]=P_sat(Ammonia;T=T[6])	T[f]=(T[5]+T[6])/2
h[17]=Enthalpy(Ammonia;x=x[6];P=P[17])	cp[f]=Cp(R134a;T=T[f];P=P[5])
v[17]=Volume(Ammonia;x=x[6];P=P[17])	

ANEXO H

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado – Fluido R134a:

```

13=s2
14=s3
15=s5
nt=0,85

T[1]=90
P[1]=P_sat(R134a;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])

s[s2]=s[1]
T[s2]=50
P[s2]=Pressure(R134a;T=T[s2];s=s[s2])
h[s2]=Enthalpy(R134a;T=T[s2];s=s[s2])

h[2]=(-nt*(h[1]-h[13]))+h[1]
P[2]=P[13]
T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];h=h[2])
s[2]=Entropy(R134a;P=P[2];h=h[2])

P[s3]=P[4]
s[s3]=s[1]
T[s3]=Temperature(R134a;P=P[s3];s=s[s3])
h[s3]=Enthalpy(R134a;s=s[s3];P=P[s3])

h[3]=(-nt*(h[2]-h[s3]))+h[2]
P[3]=P[s3]
T[3]=Temperature(R134a;P=P[3];h=h[3])
s[3]=Entropy(R134a;P=P[3];h=h[3])

T[4]=30
P[4]=P_sat(R134a;T=T[4])
x[4]=0
h[4]=Enthalpy(R134a;T=T[4];x=x[4])
s[4]=Entropy(R134a;T=T[4];x=x[4])

P[s5]=P[1]
s[s5]=s[4]
T[s5]=Temperature(R134a;P=P[s5];s=s[s5])
h[s5]=Enthalpy(R134a;s=s[s5];P=P[s5])

h[5]=((h[s5]-h[4])/nt)+h[4]
P[5]=P[s5]
T[5]=Temperature(R134a;P=P[5];h=h[5])
s[5]=Entropy(R134a;P=P[5];h=h[5])

P[6]=P[1]
T[6]=45
x[6]=0
h[6]=h[17]+v[17]*(P[6]-P[17])
s[6]=Entropy(R134a;h=h[6];P=P[6])

17=saturação_ponto_6
P[17]=P_sat(R134a;T=T[6])
h[17]=Enthalpy(R134a;x=x[6];P=P[17])
v[17]=Volume(R134a;x=x[6];P=P[17])

P[7]=P[s2]
x[7]=0
T[7]=Temperature(R134a;P=P[7];x=x[7])
h[7]=Enthalpy(R134a;x=x[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(R134a;x=x[7];P=P[7])

P[8]=P[s3]
h[8]=h[7]
s[8]=Entropy(R134a;h=h[8];P=P[8])
T[8]=Temperature(R134a;P=P[8];h=h[8])

P[9]=101,305
T[9]=20
h[9]=Enthalpy(Water;T=T[9];P=P[9])
s[9]=Entropy(Water;T=T[9];P=P[9])

P[10]=101,305
T[10]=25
h[10]=Enthalpy(Water;T=T[10];P=P[10])
s[10]=Entropy(Water;T=T[10];P=P[10])

T[11]=120
P[11]=101,305
h[11]=Enthalpy(Water;T=T[11];P=P[11])
s[11]=Entropy(Water;T=T[11];P=P[11])

P[12]=101,305
T[12]=80
h[12]=Enthalpy(Water;T=T[12];P=P[12])
s[12]=Entropy(Water;T=T[12];P=P[12])

16=f
T[f]=(T[5]+T[6])/2
cp[f]=Cp(R134a;T=T[f];P=P[5])

```

ANEXO I

Obtenção das propriedades termodinâmicas com o auxílio do software EES.

Ciclo ORC irreversível regenerativo com aquecedor de alimentação fechado – Fluido NH₃:

```

13=s2
14=s3
15=s5
nt=0,85

T[1]=90
P[1]=P_sat(Ammonia;T=T[1])
x[1]=1
h[1]=Enthalpy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(Ammonia;T=T[1];x=x[1])

s[s2]=s[1]
T[s2]=50
P[s2]=Pressure(Ammonia;T=T[s2];s=s[s2])
h[s2]=Enthalpy(Ammonia;T=T[s2];s=s[s2])

h[2]=(-nt*(h[1]-h[13]))+h[1]
P[2]=P[13]
T[2]=Temperature(Ammonia;P=P[2];h=h[2])
s[2]=Entropy(Ammonia;P=P[2];h=h[2])

P[s3]=P[4]
s[s3]=s[1]
T[s3]=Temperature(Ammonia;P=P[s3];s=s[s3])
h[s3]=Enthalpy(Ammonia;s=s[s3];P=P[s3])

h[3]=(-nt*(h[2]-h[s3]))+h[2]
P[3]=P[s3]
T[3]=Temperature(Ammonia;P=P[3];h=h[3])
s[3]=Entropy(Ammonia;P=P[3];h=h[3])

T[4]=30
P[4]=P_sat(Ammonia;T=T[4])
x[4]=0
h[4]=Enthalpy(Ammonia;T=T[4];x=x[4])
s[4]=Entropy(Ammonia;T=T[4];x=x[4])

P[s5]=P[1]
s[s5]=s[4]
T[s5]=Temperature(Ammonia;P=P[s5];s=s[s5])
h[s5]=Enthalpy(Ammonia;s=s[s5];P=P[s5])

h[5]=((h[s5]-h[4])/nt)+h[4]
P[5]=P[s5]
T[5]=Temperature(Ammonia;P=P[5];h=h[5])
s[5]=Entropy(Ammonia;P=P[5];h=h[5])

P[6]=P[1]
T[6]=45
x[6]=0
h[6]=h[17]+v[17]*(P[6]-P[17])
s[6]=Entropy(Ammonia;h=h[6];P=P[6])

17=saturação_ponto_6
P[17]=P_sat(Ammonia;T=T[6])
h[17]=Enthalpy(Ammonia;x=x[6];P=P[17])
v[17]=Volume(Ammonia;x=x[6];P=P[17])

P[7]=P[s2]
x[7]=0
T[7]=Temperature(Ammonia;P=P[7];x=x[7])
h[7]=Enthalpy(Ammonia;x=x[7];P=P[7])
s[7]=Entropy(Ammonia;x=x[7];P=P[7])

P[8]=P[s3]
h[8]=h[7]
s[8]=Entropy(Ammonia;h=h[8];P=P[8])
T[8]=Temperature(Ammonia;P=P[8];h=h[8])

P[9]=101,305
T[9]=20
h[9]=Enthalpy(Water;T=T[9];P=P[9])
s[9]=Entropy(Water;T=T[9];P=P[9])

P[10]=101,305
T[10]=25
h[10]=Enthalpy(Water;T=T[10];P=P[10])
s[10]=Entropy(Water;T=T[10];P=P[10])

T[11]=120
P[11]=101,305
h[11]=Enthalpy(Water;T=T[11];P=P[11])
s[11]=Entropy(Water;T=T[11];P=P[11])

P[12]=101,305
T[12]=80
h[12]=Enthalpy(Water;T=T[12];P=P[12])
s[12]=Entropy(Water;T=T[12];P=P[12])

16=f
T[f]=(T[5]+T[6])/2
cp[f]=Cp(R134a;T=T[f];P=P[5])

```