



Maurício Lourenço Jorge

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DE
ENERGIA TÉRMICA RESIDUAL UTILIZANDO CICLO RANKINE ORGÂNICO**

Bambuí

2021

MAURÍCIO LOURENÇO JORGE

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DE
ENERGIA TÉRMICA RESIDUAL UTILIZANDO CICLO RANKINE ORGÂNICO**

Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG, *Campus* Bambuí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, pela Linha de Pesquisa em Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio (IFMG/Arcos).

Coorientador: Prof. Dr. Lélis Pedro de Andrade (IFMG/Formiga).

Bambuí

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Bambuí
Diretoria Geral
Diretoria de Pesquisa, Inovação e Pós-graduação
Seção de Pós-Graduação
Av. Professor Mário Werneck, 2590 - Bairro Buritis - CEP 30575-180 - Belo Horizonte - MG
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

PARECER Nº 12

FICHA DE APROVAÇÃO

Dissertação de Mestrado, intitulada “**Análise técnica e econômica para implantação de Ciclo Rankine Orgânico (ORC) em indústrias térmicas**”, de autoria do mestrando em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, **Maurício Lourenço Jorge**, aprovado pela Banca Examinadora de Defesa, em 19/11/2021, com a média de **89,0 pontos**.

Houve alteração no título da Dissertação, passando a ser: “**Avaliação energética e econômica do aproveitamento de Energia Térmica Residual utilizando Ciclo Rankine Orgânico**”.

A análise das correções finais da dissertação sugeridas pela Banca Examinadora será feita pelo professor orientador.

Bambuí (MG), 19 de novembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Carrasco Carpio, Professor**, em 20/11/2021, às 08:54, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Washington Orlando Irrazabal Bohorquez, Usuário Externo**, em 20/11/2021, às 18:31, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Leis Pedro de Andrade, Professor**, em 21/11/2021, às 08:08, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Carvalho Soares, Professor**, em 22/11/2021, às 01:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1013744** e o código CRC **AF721BAF**.

Criado por [ronaldo.barbosa](#), versão 2 por [ronaldo.barbosa](#) em 20/11/2021 06:49:16.

J82m Jorge, Maurício Lourenço.
Avaliação energética e econômica do aproveitamento de energia
térmica residual utilizando ciclo Rankine Orgânico. / Maurício Lourenço
Jorge. – Bambuí, 2021.
139 f.: il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio.
Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí, MG, Curso Mestrado
Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2021.

1. Calor residual. 2. Análise técnica. 3. Análise financeira. I. Carpio,
Ricardo Carrasco. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 536.7

DEDICATÓRIA

Para Myriam e Melissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, possibilitaram a realização desse trabalho, especialmente minha família, meus colegas de trabalho, meus orientadores e o IFMG – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.

BIOGRAFIA

Discente: Maurício Lourenço Jorge

Filiação: Regina Grisotto Sansígolo e Carlos Otávio Lourenço Jorge

Naturalidade: Ribeirão Preto **Estado:** São Paulo **Data de nascimento:** 21/09/1976.

Informações escolares:

- Ensino Médio: Liceu Albert Sabin (1992 a 1994) – Ribeirão Preto/SP;
- Curso Superior: Engenharia Mecânica na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1995 a 2003). Trabalho de Conclusão de Curso voltado para o estudo da influência da adição de zircônia em ligas de hidroxiapatita;
- Curso Superior: Licenciatura em Matemática pela Unicesumar (término previsto em 2023);
- Cursos de Aperfeiçoamento: Cursos em Manutenção Produtiva Total (TPM), Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA), Lean Six Sigma, Produção enxuta, Gestão de processos produtivos, Programação de braços robóticos, Operação de pontes rolantes, Primeiros Socorros, Combate a incêndio, Trabalho e resgate em altura, Estratégias de negociação e comunicação, entre outros;
- Curso de Especialização: MBA em Gestão Estratégica de Negócios (Veris/ Metrocamp, 2013 a 2014) e Especialização em Docência (IFMG, 2019 a 2020).

Experiência profissional:

- Atuação como docente: IFMG *Campus* Avançado Arcos (2017 até o presente momento); IFMG *Campus* Bambuí (2016); Anhanguera Educacional – Campinas/SP (2015);
- Atuação como engenheiro mecânico, na área de manufatura e processos de fabricação: Denso Latin America – Santa Bárbara D'Oeste/SP (2014 a 2015); Robert Bosch Ltda – Campinas/SP (2004 a 2010); CNH Latin America – Piracicaba/SP (2003 a 2004);
- Atuação como engenheiro mecânico, na área de planejamento estratégico de produtos: Ford Motor Company – Camaçari/BA (2011 a 2012).

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a análise térmica da geração de eletricidade a partir do reaproveitamento do calor residual descartado à atmosfera, especialmente em indústrias que utilizam energia térmica em seus processos, tais como siderúrgicas, indústrias de cimento e cal, entre outras. Para isso, foi criada uma ferramenta computacional para análise técnica e financeira, desenvolvida no *Microsoft Excel*, acrescido do módulo gratuito *CoolProp*, permitindo ampla utilização no meio industrial e acadêmico. Para reaproveitamento dessa energia, foi considerado o Ciclo Rankine Orgânico (ORC). A metodologia baseou-se no estudo de teorias consolidadas de ciclos de potência, balanço de energia da 1ª Lei da Termodinâmica, fluidos de trabalho orgânicos, estimativas de custos de aquisição (MCT – *Module Costing Technique*) e métodos para análise de viabilidade econômica e financeira de investimentos. Após determinação e adoção de premissas e condições de contorno, foi desenvolvido o modelo técnico e financeiro para implementação na planilha eletrônica, juntamente com a interface do usuário. Nessa interface, são preenchidos dados como regime de trabalho, vazão e temperatura dos gases de calor residual, taxa de câmbio, impostos e preço do kWh, entre outros. A partir dos cálculos realizados pela ferramenta, são exibidos os resultados ao usuário, tais como a quantidade de energia gerada, preço da eletricidade produzida, valor do investimento, custos operacionais e *payback*, de modo a se obter resultados preliminares quanto à viabilidade de implantação de um ORC em seu processo industrial, visando a autossuficiência em relação à concessionária de energia elétrica. Adicionalmente, foram simulados dois cenários de operação, sendo um com baixo e outro com elevado calor residual disponível. Foi possível constatar condições específicas de viabilidade econômica e financeira em regimes de trabalho superiores a 6.000 horas/ano, com temperaturas acima de 150 °C e vazões superiores a 17 m³/s, de acordo com os valores estabelecidos para taxa de câmbio, alavancagem financeira e taxa mínima de atratividade. Por fim, foram analisadas as correlações entre os dados de entrada e os resultados obtidos, de modo a mapear as maiores influências em relação à viabilidade do projeto, especialmente a cotação do dólar, o preço do kWh pago à concessionária e o custo de capital, podendo fazer com que o investimento não seja recomendado, mesmo em cenários de operação com elevados valores de temperaturas, vazões e regimes de trabalho.

Palavras-chave: Calor Residual. Análise Técnica; Análise Financeira; ORC.

ABSTRACT

This paper aimed to make a thermal analysis of the electricity generation from the reuse of waste heat discharged on the atmosphere, specifically in industries that use thermal energy in their processes, such as steel, cement and lime industries, among others. For this, it was created a computational tool for technical and financial analysis, developed in Microsoft Excel, along with the CoolProp module, allowing wide use in the private setor and academia. To reuse this energy, the Organic Rankine Cycle (ORC) was considered.. The methodology was based on the study of consolidated theories of power cycles, energy balance of the 1st Law of Thermodynamics, organic working fluids, acquisition cost estimates (MCT – Module Costing Technique) and methods for financial evaluation of investments. After determining and adopting assumptions and boundary conditions, the technical and financial model was developed for implementation in the spreadsheet, along with the user interface. In this interface, data such as work regime, waste heat gas flow and temperature, exchange rate, taxes and kWh price, among others, are filled in. From the calculations performed by the tool, results are displayed to the user, such as the amount of energy generated, price of electricity produced, investment value, operating costs and payback, in order to obtain preliminary results regarding viability of implementation of an ORC system into the industrial process, aiming at self-sufficiency in relation to the electricity by the concessionaire. Additionally, two operating scenarios were simulated, one with low and one with high waste heat available. It was possible to verify specific conditions of economic and financial feasibility in work regimes exceeding 6,000 hours/year, with temperatures above 150 °C and flow rates above 17 m³/s, according to the values established for the currency exchange rate, financial leverage and minimum attractiveness rate. Finally, the correlations between the input data and the results obtained were analyzed in order to map the greatest influences in relation to the project's viability, especially exchange rate, price of kWh from the concessionaire and cost of capital, which can make the investment not recommended, even in operating scenarios with high temperatures, flow rates and working regimes.

Keywords: Organic Rankine Cycle. Residual Heat. Viability. ORC.

LISTA DE FIGURAS

01	Representação simplificada de um ORC	18
02	Exemplo de um sistema ORC com 1 MW de potência	18
03	Configuração básica de um ORC	25
04	Diagrama Temperatura-entropia do ORC	26
05	Configuração de um ORC básico	30
06	Comparação esquemática entre ORC simples e ORC com recuperação	31
07	Comparação diagramas $T-s$ entre ciclos simples/ com recuperação	32
08	Diagramas $T-s$ para ORC subcrítico e supercrítico	33
09	Diagramas $T-s$ para fluidos orgânicos isentrópicos, úmidos e secos	36
10	Temperatura máxima recomendada para um ORC seco ou isentrópico	38
11	<i>Pinch points</i> , graus de superaquecimento e sub-resfriamento	39
12	Classificação da ASHRAE 34 em relação à segurança dos fluidos	44
13	ORC de 6,5 MW para compressores (Ormat)	46
14	ORC geotérmico de 5,6 MW (Turboden)	46
15	ORC de 900 kW para siderúrgica (Exergy)	47
16	Representação do ciclo ORC com pontos e processos	60
17	Diagrama $T-s$ com a identificação dos pontos	64
18	Resultados do Cenário I	82
19	Resultados do Cenário II	84
20	Redução da despesa com eletricidade da concessionária entre Cenários I e II	86
21	Influência do regime de trabalho na produção e na redução percentual	90
22	Influência do regime de trabalho no investimento e VPL	91
23	Influência do regime de trabalho no LCOE e no <i>payback</i>	91
24	Influência da temperatura na eficiência e na potência do ciclo	93
25	Influência da temperatura na produção e na redução percentual	94
26	Influência da temperatura no investimento e no LCOE	94
27	Influência da temperatura no investimento máximo e no CAUE	94
28	Influência da temperatura no VPL e no <i>payback</i>	95
29	Influência da vazão na eficiência e na potência do ciclo	97
30	Influência da vazão na produção e na redução percentual	98
31	Influência da vazão no investimento e no LCOE	98
32	Influência da vazão no investimento máximo e no CAUE	98

33	Influência da vazão no VPL e no <i>payback</i>	99
34	Influência do preço do kWh no investimento máximo	100
35	Influência do preço do kWh no VPL e no <i>payback</i>	101
36	Influência do consumo projetado na eficiência e na potência	102
37	Influência do consumo projetado na produção e na redução percentual	103
38	Influência do consumo projetado no investimento e no LCOE	103
39	Influência do consumo projetado no investimento máximo e no CAUE	103
40	Influência do consumo projetado no VPL e no <i>payback</i>	104
41	Influência da cotação do dólar no investimento e no LCOE	105
42	Influência da cotação do dólar no investimento máximo e no CAUE	106
43	Influência da cotação do dólar no VPL e no <i>payback</i>	106
44	Influência da alavancagem financeira no LCOE	108
45	Influência da alavancagem no investimento máximo e no CAUE	108
46	Influência da alavancagem financeira no VPL e no <i>payback</i>	108
47	Influência do custo de capital no LCOE	110
48	Influência do custo de capital no investimento máximo e no CAUE	111
49	Influência do custo de capital no VPL e no <i>payback</i>	111
50	Fluxograma para elaboração da planilha de cálculo	118
51	Tela de apresentação da planilha de cálculo	119
52	Tela inicial da aba Interface Usuário	119
53	Exemplo de mensagem orientativa para entrada de dados	120
54	Exemplo de mensagem de erro em caso de preenchimento incorreto	120
55	Exemplo de mensagem informando preenchimento realizado	121
56	Exemplo de preenchimento e exibição de resultados	121
57	Aba de cálculos termodinâmicos e econômicos	122
58	Aba de cálculos do fluxo de caixa e VPL	122
59	Arquivo com instruções para utilização da planilha	123
60	Diagrama Temperatura-entropia para um fluido “seco”	135
61	Diagrama Temperatura-entropia para um fluido “úmido”	136
62	Diagrama Temperatura-entropia para um fluido isentrópico	136

LISTA DE QUADROS

01	Vantagens dos ciclos Rankine orgânico e convencional	29
02	Parâmetros comparativos entre ciclos Rankine	35
03	Esquema metodológico do presente estudo	57
04	Descrição dos fluxos, fluidos e estados físicos do ORC estudado	64
05	Principais custos associados a uma planta química	68
06	Relações escolhidas entre parâmetros de saída e as variáveis de entrada	87
07	Resumo da influência das variáveis nos resultados operacionais	112
08	Resumo da influência das variáveis nos resultados financeiros	113
09	Ficha Técnica do PTT	116

LISTA DE TABELAS

01	Temperaturas de calor residual nos processos industriais	23
02	ODP e GWP100 de alguns fluidos	42
03	Classificação do GWP100 de fluidos orgânicos	43
04	Principais fabricantes de ORC e faixas de operação	45
05	Resultados da simulação de cenários	85
06	Comparação da redução da demanda energética entre os Cenários I e II	86
07	Variáveis de entrada e valores para análise de sensibilidade	88
08	Variação dos resultados em função da variação do Regime de Trabalho	90
09	Variação dos resultados em função da variação da Temperatura	92
10	Variação dos resultados em função da variação da Vazão	97
11	Variação dos resultados em função do preço do kWh	100
12	Variação dos resultados em função do consumo projetado	102
13	Variação dos resultados em função da variação da cotação do dólar	105
14	Variação dos resultados em função da alavancagem financeira	107
15	Variação dos resultados em função do custo de capital	109
16	Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no <i>CoolProp</i> e critérios de seleção	130
17	Parâmetros K1, K2 e K3 adotados para os equipamentos do ciclo	137
18	Valores adotados para o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U)	137
19	Parâmetros B ₁ , B ₂ e F _M adotados para os equipamentos do ciclo	138
20	Parâmetros C ₁ , C ₂ e C ₃ adotados para os equipamentos do ciclo	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE: Sociedade Americana dos Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (*American Society for Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*)

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CAUE: Custo Anual Equivalente Uniforme

CMPC: Custo Médio Ponderado de Capital (ou Custo de Capital)

CO₂: Dióxido de Carbono

FCO: Fluxo de Caixa Operacional

GWP: Potencial de Aquecimento Global (*Greenhouse Warming Potential*)

H₂O: Água

i: Taxa de juros

IFMG: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

IOF: Imposto sobre Operações Financeiras

IR: Imposto de Renda

kWh: kilowatt-hora

LCOE: Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost Of Energy*)

MPSTA: Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental do IFMG

ODP: Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (*Ozone Depletion Potential*)

ORC: Ciclo Rankine Orgânico (*Organic Rankine Cycle*)

PTT: Produto Técnico e Tecnológico

t: Vida útil do sistema

TIR: Taxa Interna de Retorno

TMA: Taxa Mínima de Atratividade

U: Coeficiente Global de Transferência de Calor (W/m².K)

VF: Valor Futuro

VP: Valor Presente

VPL: Valor Presente Líquido

LISTA DE VARIÁVEIS DAS EQUAÇÕES TERMODINÂMICAS

- h_1 : entalpia do fluido orgânico no ponto 1;
 h_2 : entalpia do fluido orgânico no ponto 2;
 h_{2s} : entalpia do fluido orgânico no ponto 2 (isentrópica);
 h_3 : entalpia do fluido orgânico no ponto 3;
 h_4 : entalpia do fluido orgânico no ponto 4;
 h_{4s} : entalpia do fluido orgânico no ponto 4 (isentrópica);
 h_A : entalpia dos gases de exaustão no ponto A (entrada);
 h_B : entalpia dos gases de exaustão no ponto B (saída);
 h_C : entalpia da água de resfriamento no ponto C (entrada);
 h_D : entalpia da água de resfriamento no ponto D (saída);
 \dot{m}_{gases} : vazão mássica dos gases de exaustão;
 \dot{m}_f : vazão mássica do fluido orgânico;
 \dot{m}_{H_2O} : vazão mássica da água de resfriamento;
 \dot{Q}_{in} : calor recebido pelo sistema;
 \dot{Q}_{out} : calor expelido pelo sistema;
 v_3 : volume específico do fluido orgânico no ponto 3;
 d_3 : densidade do fluido orgânico no ponto 3;
 P_3 : pressão do fluido orgânico no ponto 3;
 P_4 : pressão do fluido orgânico no ponto 4;
 \dot{W}_p : potência consumida pela bomba;
 \dot{W}_{exp} : potência de eixo produzida pela turbina;
 $\dot{W}_{elétr}$: potência elétrica produzida pelo gerador;
 $\dot{W}_{Líquido}$: potência líquida produzida pelo ciclo;
 η_{comp} : eficiência da bomba;
 η_{exp} : eficiência da turbina;
 η_{ger} : eficiência do gerador;
 η_{ciclo} : eficiência do ciclo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação e contribuições do presente trabalho	20
1.2	Objetivos do presente trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Ciclo Rankine Orgânico	22
2.1.1	<i>Configurações de ORC</i>	29
2.1.1.1	Ciclo ORC básico	30
2.1.1.2	Ciclo ORC com recuperação	31
2.1.1.3	Ciclo ORC subcrítico e supercrítico	33
2.1.2	<i>Fluido orgânico</i>	34
2.1.3	<i>Fabricantes de sistemas ORC</i>	44
2.2	Desenvolvimento Sustentável na recuperação de calor residual	48
2.3	Análise econômica e financeira de projetos	49
2.3.1	<i>Métodos de análise econômica e financeira</i>	50
2.3.1.1	Valor Presente Líquido (VPL)	51
2.3.1.2	<i>Payback</i>	53
2.3.1.3	Custo Anual Equivalente Uniforme (CAUE)	54
2.3.2	<i>Depreciação e valor residual</i>	55
3	METODOLOGIA	56
3.1	Modelo Técnico	59
3.1.1	<i>Seleção dos fluidos</i>	60
3.1.2	<i>Condições de Operação</i>	62
3.1.3	<i>Metodologia para cálculo do ciclo</i>	63
3.2	Modelo Financeiro	67
3.2.1	<i>Metodologia para estimativa dos custos de aquisição</i>	67
3.2.2	<i>Premissas e equações financeiras</i>	73
4	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS	79
4.1	Cenário I: Baixo potencial energético	79
4.1.1	<i>Premissas de simulação</i>	79
4.1.2	<i>Resultados da Simulação</i>	81
4.2	Cenário II: Elevado potencial energético	82

4.2.1	<i>Premissas de simulação</i>	82
4.2.2	<i>Resultados da Simulação</i>	83
4.3	Análise de sensibilidade e de cenários	84
4.3.1	<i>Resultados obtidos</i>	84
4.3.2	<i>Análise de sensibilidade das variáveis de entrada</i>	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
5.1	Conclusões	113
5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	114
6	PRODUTO TÉCNICO E TECNOLÓGICO (PTT)	115
6.1	Apresentação do PTT	115
6.2	Características do PTT	115
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A – Lista dos fluidos orgânicos selecionados	129
	APÊNDICE B – Temperaturas de entropia máxima dos fluidos selecionados	134
	APÊNDICE C – Parâmetros utilizados para estimativa de custos	136

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da atividade industrial, são cada vez mais frequentes os processos de fabricação que descartam calor para a atmosfera, o que contribui com o aumento da temperatura média do ambiente, intensifica o consumo de fontes não-renováveis de energia e aumenta a liberação de gases de efeito estufa. Por outro lado, gradativamente, vem aumentando a busca pela otimização dos processos energéticos, em decorrência do aumento da competitividade e das cada vez mais exigentes metas de redução do consumo de recursos naturais.

Dessa forma, têm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas diversas tecnologias associadas ao reaproveitamento de energia, tais como aquelas que visam a utilização do calor de gases de exaustão descartados para a atmosfera para a produção de energia elétrica, como por exemplo o Ciclo Rankine.

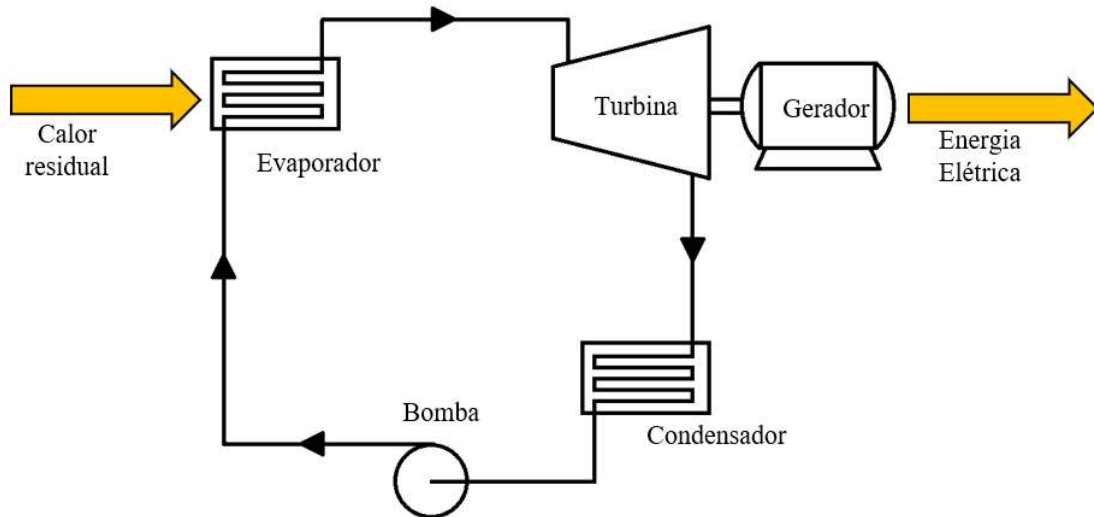
O ciclo Rankine consiste em um sistema fechado em que um fluido de trabalho circula continuamente através de equipamentos para transformar calor em energia mecânica, que em seguida é transformada em energia elétrica (SPROUSE; DEPCIK, 2013). O principal inconveniente do Ciclo Rankine convencional é que são necessárias elevadas temperaturas para seu funcionamento em níveis satisfatórios. Como em muitos dos processos industriais estão presentes baixos e médios gradientes de temperatura, surge como alternativa o Ciclo Rankine Orgânico (ORC), que costuma ser o mais indicado para estes casos (NOUMAN, 2012; PERIS *et al.*, 2015a).

Estima-se que em torno de 20 a 50% da energia utilizada nos processos industriais seja perdida na forma de calor residual (LE *et al.*, 2014), portanto, tem-se elevado potencial de reaproveitamento de energia térmica descartada na atmosfera. Dessa forma, existe amplo mercado para aplicação de ORC em situações de aproveitamento de calor residual sob a forma de gases quentes, especialmente em temperaturas propícias para aplicação dessa tecnologia, tais como mineradoras e fabricantes de cal e cimento, entre outras indústrias.

Dentre os principais componentes de um ORC, estão o evaporador, onde o fluido absorve energia térmica da fonte quente, passando para a fase de vapor; o conjunto turbina/gerador, onde ocorrem a expansão do fluido, transformação da energia térmica absorvida pelo fluido em mecânica (pelo acionamento da turbina) e mecânica em elétrica, uma vez que o gerador é acionado pela turbina; o condensador, onde o fluido retorna à fase líquida; e a bomba hidráulica, cuja função é propelir o fluido pelo sistema. O funcionamento contínuo deste ciclo

garante geração de eletricidade enquanto a fonte quente permanecer ativa (ZHANG *et al.*, 2018), conforme pode ser visto na Figura 1.

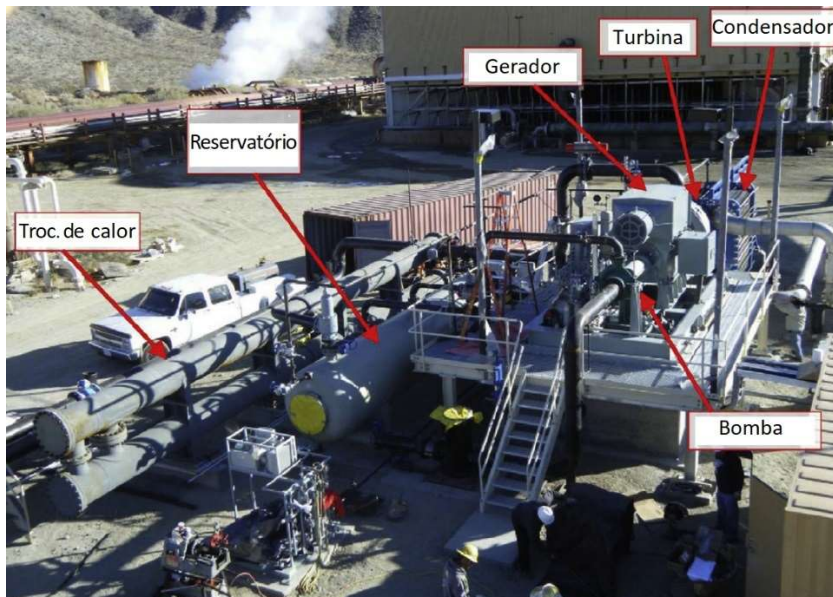
Figura 1 – Representação simplificada de um ORC.



Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2018.

A representação simplificada da Figura 1 não inclui todos os componentes do ciclo, tais como sistemas de segurança, suportes, tubulações, instrumentação e dispositivos auxiliares. A Figura 2 mostra um exemplo de sistema ORC, de modo a fornecer melhor visualização de ciclos de potência dessa natureza.

Figura 2 – Exemplo de um sistema ORC com 1 MW de potência



Fonte: Adaptado de MACCHI; ASTOLFI, 2016.

Os ORCs, assim como outros sistemas de potência, podem demandar elevados volumes de investimento, que devem ser realizados mediante análise técnica e financeira adequadas.

Um dos principais fatores a serem considerados na análise técnica é a segurança operacional, já que alguns dos fluidos orgânicos possuem elevada inflamabilidade, o que torna especialmente importante evitar vazamentos em tubulações e conexões (TIAN *et al.*, 2017), ou ainda podem oferecer riscos ambientais, seja pela degradação da camada de ozônio ou pela liberação de gases de efeito estufa. Deve-se, portanto, prezar pelo equilíbrio entre a eficiência do ciclo, que impacta diretamente sobre o prazo para retorno do investimento, e os potenciais riscos à segurança e ao meio ambiente.

Adicionalmente, devem ser considerados também outros fatores técnicos, tais como o regime de trabalho do sistema, a temperatura e a vazão dos gases quentes, as eficiências dos equipamentos utilizados, o fluido orgânico utilizado e a temperatura da água de resfriamento, entre outros. No entanto, os fatores com maior influência no rendimento global de um sistema ORC são as eficiências de trocas térmicas no evaporador e condensador (ZHITONG *et al.*, 2018), bem como as propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho.

Além dos fatores técnicos, devem ser analisados também aspectos financeiros, tais como o montante a ser investido e os custos operacionais, a vida útil dos ativos, os riscos associados ao projeto de investimento, a economia proporcionada pela geração de eletricidade e o prazo para retorno do investimento. Em se tratando dos aspectos econômicos, podem ser citados, principalmente, o valor do kWh, as taxas de juros, impostos e a cotação do dólar.

Nesse sentido, este trabalho propõe analisar a implantação de ORCs em indústrias que liberam calor residual, a partir de processos térmicos, por meio do desenvolvimento e disponibilização de uma ferramenta, em forma de planilha eletrônica, para construção de cenários prévios de viabilidade técnica e financeira de geração de energia elétrica a partir da recuperação de calor residual. Tal ferramenta poderá fornecer subsídios quanto a tomada de decisões pelos gestores industriais, assim como possibilitar análises preliminares de ORCs por profissionais e estudantes da área térmica e/ou financeira. Através do preenchimento de parâmetros de entrada, são obtidos valores estimados da quantidade de energia elétrica produzida pelo ciclo, sob as condições apresentadas, bem como a economia gerada pela produção de eletricidade, o valor aproximado de investimento necessário, os custos operacionais anuais e o prazo para retorno do investimento, entre outras informações.

A ferramenta desenvolvida foi elaborada de maneira simples e intuitiva, baseada em *software* já amplamente difundido no meio corporativo, tornando desnecessário adquirir

quaisquer programas adicionais. Justifica-se, assim, o alinhamento deste trabalho com a linha de pesquisa Tecnologia Ambiental.

1.1 Motivação e contribuições do presente trabalho

Em um grande número de indústrias, dos mais diversos ramos de atuação, existem processos produtivos que liberam para a atmosfera gases quentes, sob a forma de calor excedente, descartando assim grande quantidade de energia no ambiente, ainda que em temperaturas médias ou baixas. Dentre tais empresas, podem ser mencionadas, entre outras, siderúrgicas e fabricantes de cimento e cal, foco primário deste estudo.

Destaca-se, no contexto industrial do Estado de Minas Gerais, local onde foi desenvolvido o presente estudo, mais de 800 indústrias atuantes em tais ramos de atividade (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE, 2020), compondo um cenário com potencial demanda pelo estudo e utilização de sistemas ORC, que são amplamente utilizados para aproveitamento de energia térmica a temperaturas baixas e médias, capazes de proporcionar a redução de custos operacionais, por meio da geração de eletricidade própria a partir do calor residual descartado para a atmosfera, reduzindo ou até mesmo eliminando a dependência em relação à concessionária de energia elétrica.

Um sistema ORC, cuja configuração básica constitui o foco deste trabalho, é composto, principalmente, por equipamentos como trocadores de calor, bomba e turbina, além de tubulações e dispositivos de instrumentação e controle.

Conforme já foi mencionado, os investimentos normalmente volumosos de sistemas dessa natureza demandam informações bem embasadas para análise técnica e financeira, o que deve ser feito de maneira embasada, de modo a expandir as opções decisórias por parte de investidores e gestores, que estejam buscando alternativas para aplicação de recursos que visem melhores resultados financeiros em suas empresas.

Para realização de tal análise, mostra-se muito pertinente a existência de uma ferramenta tecnicamente embasada e de fácil utilização, pela qual sejam possíveis análises técnicas e financeiras, ainda que preliminares, em relação à implantação de ORC como forma de gerar eletricidade a partir de calor descartado à atmosfera. É nesse momento que o produto técnico proposto no presente estudo mostra sua principal contribuição, fornecendo ao gestor industrial, especialmente do setor térmico, como siderúrgicas, fabricantes de cal e/ou cimento, entre outras, resultados prévios de viabilidade técnica e financeira, mediante o cenário operacional disponível. A partir dos valores obtidos, pode-se decidir pela contratação de

consultorias especializadas em implantação de ciclos de potência, a fim de se obter maior detalhamento quanto ao projeto de investimento necessário.

No caso de empresas que futuramente vierem a optar pela implantação de sistemas de recuperação de energia residual em seus processos (como o ORC), haverá melhoria de seus resultados financeiros, uma vez que se pode reduzir, parcial ou totalmente, o consumo da energia elétrica fornecida pelas concessionárias. Indiretamente, além dos potenciais ganhos à sustentabilidade financeira das empresas por meio da redução de custos, este trabalho pode contribuir também sob aspectos ambientais (reaproveitamento de energia residual, com menor consumo de eletricidade fornecida pela rede e consequentemente reduzindo a pegada ecológica) e sociais (difusão do conhecimento e de melhores práticas industriais e financeiras, além do estímulo ao desenvolvimento de novas pesquisas).

Adicionalmente, essa ferramenta também poderá contribuir com futuros estudos sobre ORC no meio acadêmico, servindo como material de apoio a disciplinas da área térmica e/ou financeira.

1.2 Objetivos do presente trabalho

O objetivo geral do presente estudo consiste em identificar cenários preliminares aproximados de viabilidade técnica e financeira de geração de energia elétrica a partir da implantação de um sistema ORC em processos industriais, por meio de ferramenta simples e de amplo alcance.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Modelar tecnicamente o sistema ORC, utilizando conceitos termodinâmicos como embasamento para criação de planilha eletrônica;
- Determinar e aplicar os métodos de levantamento de custos de aquisição, instalação e operação, bem como os métodos de avaliação econômica e financeira;
- Criar planilha eletrônica para cálculo de energia elétrica gerada a partir da instalação do ORC, mediante dados de entrada do usuário;
- Simular cenários operacionais distintos, por meio da planilha, e analisar os resultados e a sensibilidade dos principais parâmetros de entrada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente tópico descreve o arcabouço teórico do presente estudo, sendo primeiramente apresentados conceitos e definições relacionados aos ciclos de recuperação de calor, notadamente os Ciclos Rankine convencional e orgânico. Na sequência, são apresentados as principais configurações normalmente utilizadas e os principais fabricantes de sistemas ORC. Em seguida, abordou-se o desenvolvimento sustentável na recuperação de calor residual, seguido pelos principais métodos de análise econômica e financeira, ciclo de vida de um investimento, depreciação e valor residual de ativos.

2.1 Ciclo Rankine Orgânico (ORC)

Uma parte significativa dos processos industriais, assim como de produção de energia elétrica, depende fortemente de operações que envolvem a queima de combustíveis, gerando grande quantidade de calor. Devido principalmente às irreversibilidades que ocorrem em processos de combustão, a baixa eficiência inerente à queima de combustíveis faz com que seja necessária a geração de calor em excesso, para garantir transferência de calor adequada. Assim, nas indústrias, grande quantidade de energia acaba sendo descartada no ambiente, sob a forma de calor (JUNG; TAYLOR; KRUMDIECK, 2015).

A parcela excedente do calor gerado, sem aproveitamento prático, é denominada calor residual (LE *et al.*, 2014) e seu descarte, especialmente quando na forma de gases quentes, pode causar impactos negativos, seja pelo aspecto ambiental (aquecimento da atmosfera, consumo de recursos naturais, degradação da camada de ozônio, efeito estufa, contaminação do meio-ambiente) ou pelo aspecto econômico das empresas, uma vez que houve aplicação de recursos financeiros para geração de calor.

Uma vez que a saúde financeira das empresas depende diretamente da otimização dos recursos disponíveis, busca-se cada vez mais a redução dos custos de produção, o que envolve, entre outras coisas, o combustível utilizado para geração do calor necessário aos processos. Para redução do consumo desses recursos, tem-se buscado reaproveitar o calor residual descartado no ambiente, seja para utilização desse calor nos processos produtivos, seja para gerar energia elétrica, para utilização na própria planta.

O potencial para aproveitamento do calor residual é dado pela eficiência de Carnot, que por sua vez depende das temperaturas da fonte quente (no caso, a fonte de calor residual) e da fonte fria (geralmente a temperatura ambiente). Dessa forma, quanto maior a diferença entre

as temperaturas da fonte quente e fria, maior o potencial para geração de reaproveitamento da energia.

Em relação às faixas de temperatura, as fontes de calor costumam ser classificadas em baixa, média e alta temperatura, respectivamente até 230 °C, de 230 °C a 650 °C e acima de 650 °C (ZHOU *et al.*, 2013).

Quando se fala em calor residual sob a forma de gases quentes oriundos de processos industriais, a maior parte das fontes de calor é de baixa temperatura (PERIS *et al.*, 2015b), o que pode ser observado na Tabela 1. A abundância de fontes de calor de baixa qualidade (baixa temperatura) torna-se um fator de interesse, apesar da baixa entalpia associada e menor valor econômico, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de estudos e tecnologias relacionadas ao reaproveitamento da energia descartada.

Tabela 1 – Temperaturas de calor residual nos processos industriais.

(continua)

Indústria	Processo	Temperatura (°C)
Cimento	Gases de exaustão dos fornos	200-450
	Gases de resfriamento dos fornos	200-300
Aço	Fornos elétricos a arco	250
	Rolos de laminação	300-450
	Gases das chaminés dos fornos de coqueificação	190
	Gases de altos-fornos	250-300
Vidro	Fusão dos recipientes de vidro	140-200
	Fusão de fibra de vidro	140-160
Química	Gases de exaustão de fornos de processamento	340
	Gases de exaustão de caldeiras	230
	Gases de refinaria	150-300
	Turbina a gás	370-540

Tabela 1 – Temperaturas de calor residual nos processos industriais.

(conclusão)

Indústria	Processo	Temperatura (°C)
Alimentos	Fritadeiras	120-210
	Gases de Exaustão	160
Cerâmica	Gases dos Fornos	200-300
Outros	Motores de Combustão Interna	400-550

Fonte: Adaptado de PERIS *et al.*, 2015b.

Dentre as possibilidades para aproveitamento do calor residual, pode ser mencionado o Ciclo Rankine, cuja tecnologia tem sido usada há muitas décadas e é interessante principalmente em fontes de calor de elevada temperatura. Nos casos de calor de baixa temperatura, a utilização de ciclos de potência a vapor acaba se tornando menos competitiva, já que a complexidade dos equipamentos e processos envolvidos tende a aumentar. Assim, costuma ser mais interessante o aproveitamento de gases de exaustão de turbinas a gás, por exemplo, por meio de cogeração, motores de combustão interna acoplados a geradores ou mesmo os Ciclos Rankine convencionais; o calor residual desses sistemas, inevitavelmente, terá valores de temperatura mais baixos e usualmente são descartados para a atmosfera, ainda com certa quantidade de energia térmica associada e não utilizada (IZIDORO, 2016).

De qualquer maneira, uma vez que o consumo de combustíveis fósseis tem aumentado, intensificando problemas ambientais (principalmente aquecimento global), têm sido desenvolvidas soluções para aproveitamento do calor residual de médias e, principalmente, baixas temperaturas. Dentre as opções existentes, destaca-se o ORC. Por ser uma variação do Ciclo Rankine convencional, o ORC funciona de maneira semelhante a este e, portanto, se beneficia de uma tecnologia madura e consolidada, tornando-se uma solução bastante interessante.

O fato que torna o ORC adequado ao aproveitamento de calor residual de baixas temperaturas é a utilização de um fluido orgânico, diferentemente do ciclo Rankine convencional, que utiliza água (KAŠKA, 2014). O ORC permite instalação de sistemas de menor porte e menor complexidade, quando comparado ao Ciclo Rankine convencional.

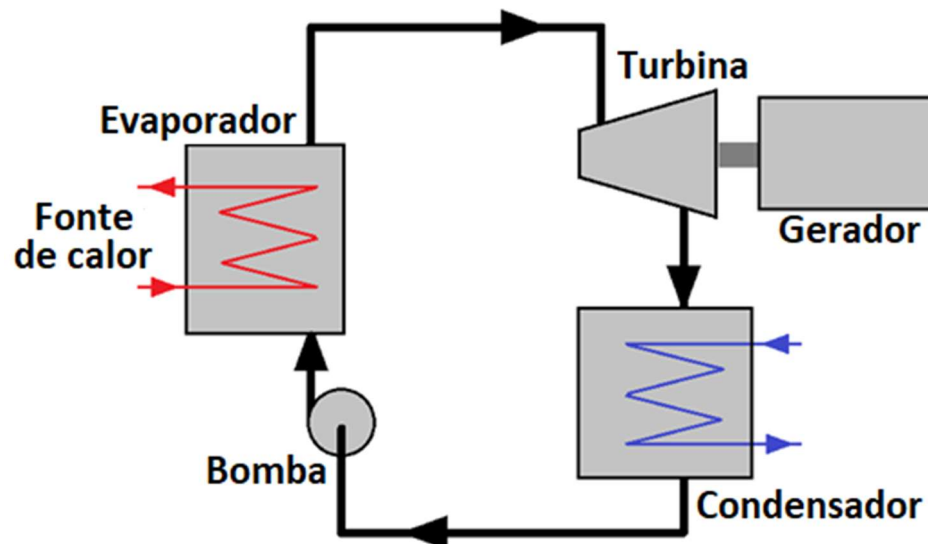
Apesar de existirem outras tecnologias para aproveitamento de calor residual de baixas e médias temperaturas, os ORCs têm sido predominantes em situações reais, justamente

pela relativa simplicidade, tecnologia consolidada e existência de fornecedores de equipamentos e componentes (ZIVIANI; BEYENE; VENTURINI, 2014). Por tais motivos, os ciclos ORC, especialmente em sua configuração básica, serão o foco deste estudo.

O Ciclo Rankine é o nome atribuído a um dos possíveis sistemas térmicos normalmente utilizados para geração de eletricidade a partir de fontes de calor. Esse tipo de ciclo de potência baseia-se em um fluido de trabalho confinado, circulando continuamente por equipamentos destinados a transformar calor em energia mecânica, posteriormente transformada em energia elétrica. Seu funcionamento consiste nas seguintes etapas: transferência de calor para o fluido, transformando-o em vapor; transferência dessa energia para uma turbina (dispositivo expensor), acionando um gerador elétrico acoplado a ela; condensação do fluido, retornando-o à fase líquida; e pressurização do fluido, reiniciando o ciclo (PERIS *et al.*, 2015b). Esta solução é amplamente utilizada em usinas termelétricas, geotérmicas e nucleares, entre outras, para geração de eletricidade.

Assim, os cinco principais equipamentos que compõem um Ciclo Rankine Orgânico são bomba, evaporador, turbina, condensador e gerador, conforme Figura 3.

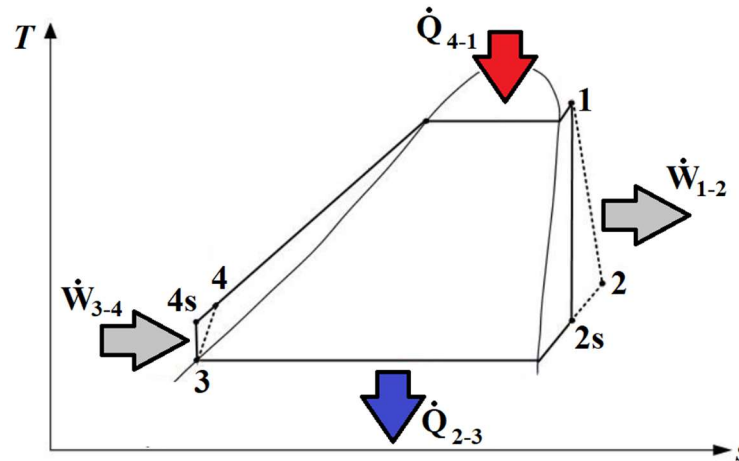
Figura 3 – Configuração básica de um ORC



Fonte: adaptado de XI *et al.*, 2015.

Os processos pelos quais o fluido passa ao longo do ORC podem ser identificados em um diagrama $T-s$ (Temperatura-entropia), conforme Figura 4.

Figura 4 – Diagrama Temperatura-entropia do ORC.



Fonte: adaptado de XI *et al.*, 2015.

Os processos são descritos a seguir:

Processo 3→4: A bomba pressuriza o fluido, elevando a pressão e propelindo-o em direção ao evaporador (elevação da pressão do fluido);

Processo 4→1: A fonte quente transfere calor para o fluido no evaporador (elevação da temperatura do fluido, a pressão constante), ocasionando a produção de vapor;

Processo 1→2: Ocorre expansão do fluido, com produção de trabalho de eixo na turbina, acoplada a um gerador elétrico;

Processo 2→3: Ocorre rejeição de calor, também a pressão constante, no condensador, retornando o fluido à fase líquida, retornando à bomba em seguida e reiniciando o ciclo.

Para fins de comparação, no diagrama T - s estão representadas as condições de operação reais (etapas 3-4-1-2) e ideais (etapas 3-4s-1-2s). Os pontos 4 e 2 representam, respectivamente, o estado do fluido de trabalho após ser pressurizado na bomba e após passar pela turbina, em situação real de operação, ou seja, com aumento de entropia. Os pontos 4s e 2s, por outro lado, representam os mesmos estados do fluido, porém considerando que não haja aumento de entropia durante elevação ou redução da pressão do fluido. Também estão representados no diagrama a potência necessária ao funcionamento da bomba (\dot{W}_{3-4}), a potência mecânica gerada no processo de expansão (\dot{W}_{1-2}), o calor fornecido pela fonte quente no evaporador (\dot{Q}_{4-1}) e o calor rejeitado no condensador (\dot{Q}_{2-3}).

Além de permitir a extração de energia a partir de fontes de baixa temperatura (até 230 °C), o ORC é bastante versátil e pode ser aplicado em fontes geotérmicas, elétricas e de calor residual, tais como gases de exaustão em indústrias térmicas. Essa versatilidade, associada à

relativa simplicidade construtiva (número reduzido de equipamentos), facilidade de operação e *layouts* industriais mais enxutos (MACCHI; ASTOLFI, 2016), faz com que o ORC seja a opção primária no que diz respeito ao aproveitamento do calor residual de gases quentes de baixa temperatura gerados em processos térmicos, visando aumento da eficiência energética do setor industrial.

O potencial de aplicação de ORC pode ser constatado pelo crescente número de pesquisas e trabalhos acadêmicos sendo desenvolvidos neste ramo, notadamente em países asiáticos. Os principais aspectos estudados abrangem, em sua maioria, pesquisas sobre viabilidade técnica e financeira, desempenho termodinâmico de diferentes configurações dos ciclos e seleção do fluido de trabalho. Cabe destacar que a escolha do fluido é um dos principais fatores para desempenho adequado do ciclo (MACCHI; ASTOLFI, 2016).

Mesmo diante das restrições impostas pelas baixas temperaturas das fontes de calor residual, o ORC tem se firmado com a melhor opção para aumento de eficiência, redução de emissões de poluentes e geração de calor e eletricidade, por meio do reaproveitamento da energia térmica. Fatores operacionais podem ser decisivos quando da escolha pelo tipo de sistema a ser implantado, principalmente quando se comparam os Ciclos Rankine Orgânicos e convencionais.

Existem muitas semelhanças entre o ORC e o Ciclo Rankine convencional, principalmente no que diz respeito ao princípio de funcionamento e aos equipamentos envolvidos. Além disso, ambos permitem inclusão de sistemas de recuperação ou regeneração, aumentando a eficiência global do ciclo pelo aproveitamento parcial do calor do fluido após o processo de expansão, para diminuir a energia necessária para elevação deste antes do evaporador.

Apesar dessas semelhanças, deve-se ressaltar que a principal diferença entre esses dois ciclos está no fluido de trabalho utilizado: enquanto Ciclos Rankine convencionais utilizam água (com elevados pontos de fusão e evaporação), os ORC utilizam substâncias orgânicas, que geralmente possuem pontos de fusão e evaporação inferiores aos da água, sob as mesmas condições de pressão (BAO; ZHAO, 2013). Isso permite que fontes térmicas de baixa temperatura sejam suficientes para vaporizar o fluido, com energia suficiente para movimentação da turbina e geração de eletricidade (LI; DAI, 2014).

Adicionalmente, como as temperaturas envolvidas são mais baixas que em Ciclos Rankine convencionais, o tamanho e a complexidade dos equipamentos envolvidos em ORCs também tendem a ser menores, conseqüentemente reduzindo a complexidade das instalações.

Em contrapartida, a utilização de fluidos orgânicos gera algumas desvantagens em relação à utilização da água como fluido de trabalho, tais como custo de aquisição e reposição,

muito superiores aos da água; eventuais riscos ambientais (degradação da camada de ozônio, geração de gases de efeito estufa) e/ou operacionais (inflamabilidade, compatibilidade termoquímica); maior consumo de energia na bomba (devido a viscosidade elevada), entre outros.

Por outro lado, a principal vantagem quanto à utilização de fluidos orgânicos é justamente a possibilidade de extração de energia elétrica a partir de fontes de calor de baixas temperaturas, o que seria inviável com ciclos Rankine convencionais, fazendo com que seja possível extrair energia de gases normalmente descartados para a atmosfera (resíduos), inclusive após sistemas de reaproveitamento já existentes. Outra vantagem da utilização de fluidos orgânicos é que a expansão geralmente se dá em uma única fase (vapor), fazendo com que possam ser utilizadas turbinas com menores custos de aquisição e manutenção em relação às turbinas dos ciclos Rankine convencionais (CHEN; GOSWAMI; STEFANAKOS, 2010), em que as fases líquido e vapor normalmente coexistem durante o processo de expansão.

Em última instância, a temperatura da fonte quente passa a ser o principal critério a ser adotado quando da escolha de um sistema de reaproveitamento de calor residual. Devido à água possuir elevado ponto de fusão, os Ciclos Rankine convencionais costumam ser a solução mais interessante para fontes de calor com elevadas temperaturas, o que justifica o maior porte e complexidade dos equipamentos. Já os ORCs, por sua vez, estão entre as melhores alternativas para utilização em fontes de calor de baixas temperaturas, que são o foco do presente estudo.

Quoilin *et al.* (2013) apresentam, adicionalmente, as seguintes diferenças entre os ciclos Rankine convencionais e os ORC:

- a) ao contrário da água, a maioria dos fluidos orgânicos já se encontra no estado de vapor superaquecido ao final do processo de expansão, tornando desnecessário o superaquecimento. Em vista disso, reduzem-se as chances de ocorrer condensação durante a expansão, reduzindo assim potenciais danos por corrosão nas palhetas da turbina, aumentando sua vida útil e reduzindo custos de manutenção;
- b) a água, nas regiões de baixas pressões do ciclo Rankine convencional, possui densidade relativamente baixa, tendendo a aumentar a vazão volumétrica e, assim, exigindo maiores diâmetros de tubulação (a fim de manter as velocidades de escoamento em valores aceitáveis) e maiores equipamentos trocadores de calor e de expansão (turbinas);
- c) os ciclos Rankine convencionais, por necessitarem de superaquecimento da água, evitando assim a formação de condensado no processo de expansão, operam em temperaturas normalmente acima dos 400 a 450°C na entrada da turbina, exigindo

equipamentos mais sofisticados e de custo mais elevado (especialmente caldeira, trocadores de calor e turbina);

- d) pode haver diferenças significativas na potência consumida pela bomba, principalmente em função da viscosidade e vazão volumétrica necessária;
- e) os níveis de pressão de ciclos Rankine convencionais são geralmente bastante superiores aos níveis de pressão de ORCs, exigindo maiores e mais complexas caldeiras, contribuindo assim para maiores custos de aquisição, manutenção e operação;
- f) em função da utilização da água como fluido de trabalho, os ciclos Rankine convencionais demandam a instalação de sistemas de tratamento da água, a fim de garantir sua pureza e nível de aeração dentro dos limites adequados, evitando corrosão das peças metálicas do sistema;
- g) ORCs costumam apresentar eficiências ligeiramente inferiores em relação aos Ciclos Rankine convencionais.

O Quadro 1 apresenta, resumidamente, as principais vantagens dos ciclos Rankine Orgânico e convencional.

Quadro 1 – Vantagens dos ciclos Rankine orgânico e convencional.

Vantagens – ORC	Vantagens – Rankine convencional
Não há necessidade de superaquecimento	Alta eficiência
Menores temperaturas de evaporação	Baixo custo do fluido
Maiores pressões de condensação	Fluido de baixo impacto ambiental
Sem necessidade de tratamento do fluido	Fluido não inflamável e não tóxico
Não há necessidade de desareador	Alta estabilidade química do fluido
Equipamentos mais simples	Baixo consumo da bomba
Possibilidade de recuperação de calor a baixas temperaturas	

Fonte: Adaptado de QUOILIN *et al.*, 2013.

2.1.1 Configurações de ORC

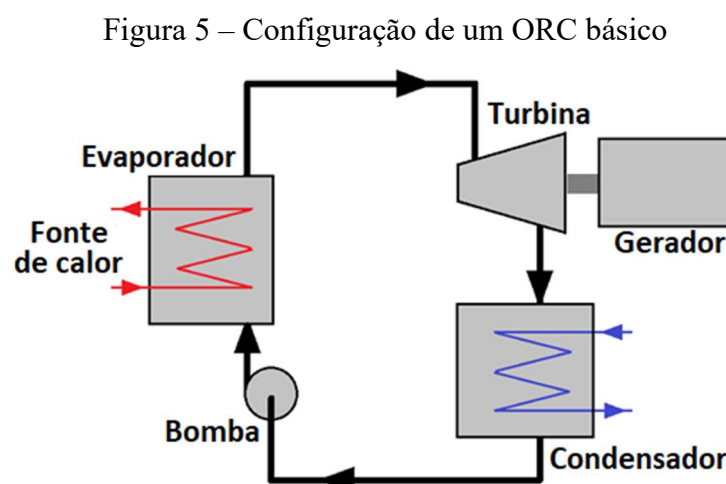
Uma vez que a arquitetura do ORC exerce grande influência na eficiência da planta e na geração de energia, estão disponíveis na literatura muitas possibilidades para melhor aproveitamento das fontes de calor de baixas e médias temperaturas (MEINEL; WIELAND; SPLIETHOFF, 2014). Vale ressaltar, no entanto, que existe influência mútua entre o fluido de trabalho e a configuração do ciclo.

Ciclos Rankine Orgânicos mais complexos tendem a apresentar maior eficiência e/ou gerar maior potência, no entanto, sob pena de necessitar etapas adicionais no processo, equipamentos em maior número ou de maior complexidade, alterando assim a relação benefício/custo. Com isso, é necessária uma análise criteriosa, sob os aspectos técnicos, operacionais e financeiros, em relação à configuração adotada para o ORC, visando os melhores resultados possíveis.

Existem muitas possibilidades de configurações de ORC. Entretanto, como o presente estudo tem como objetivo a implantação de um ORC básico, serão mostrados a seguir apenas os ciclos de configuração básica e com recuperação, que poderão ser abordados em trabalhos futuros.

2.1.1.1 ORC básico

Até este momento, tudo o que foi abordado sobre ORC refere-se à configuração básica do ciclo (S-ORC – *Simple Organic Rankine Cycle*, ou ORC Simples). Nesta configuração, conforme a Figura 5, os equipamentos principais são: bomba, evaporador, turbina (acoplada a um gerador) e condensador.



Fonte: Adaptado de XI *et al.*, 2015.

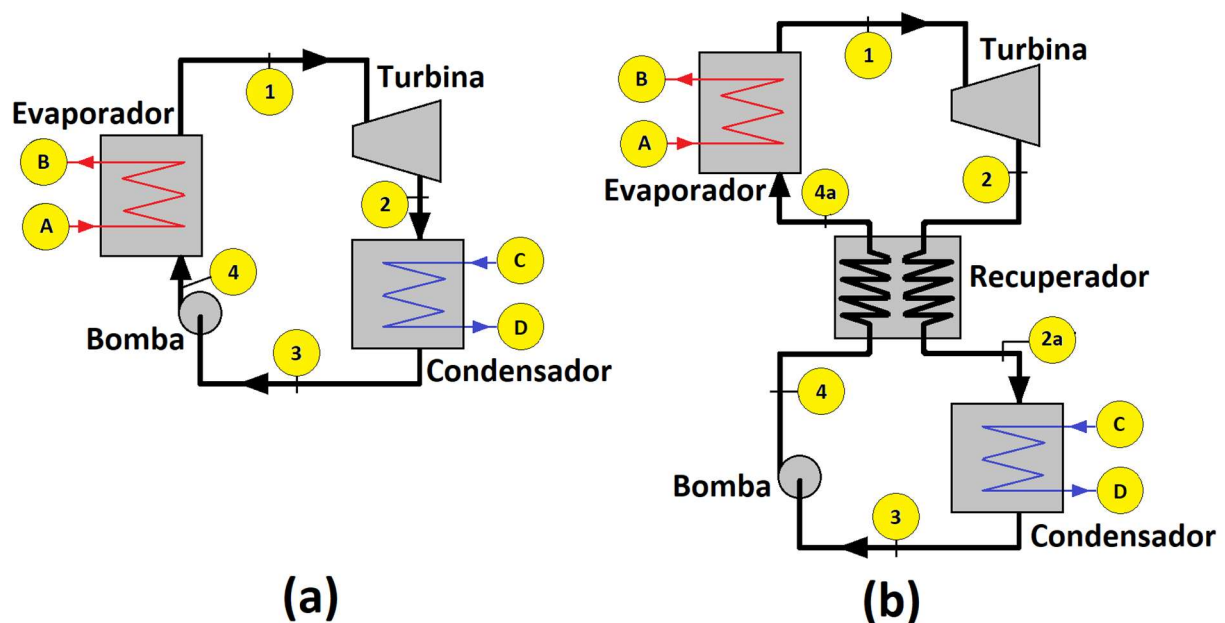
Em função do fluido adotado, podem ser necessárias diferentes especificações para os equipamentos; por exemplo, alguns fluidos podem demandar um trocador de calor intermediário entre a fonte de calor e o evaporador, para evitar contaminações ou riscos de acidentes. De qualquer forma, os níveis de pressão e temperatura dependerão fortemente da própria fonte de calor, além das propriedades físicas do fluido.

2.1.1.2 ORC com recuperação

Recuperação é o nome que se dá à extração de calor a partir do fluido que deixa o processo de expansão (turbina), com o propósito de pré-aquecer o fluido de trabalho na entrada do evaporador, fazendo com que uma menor energia seja necessária para elevar a temperatura do fluido no processo de evaporação. Essa prática não chega a aumentar o trabalho líquido produzido na expansão, no entanto melhora a eficiência global do ciclo, em relação ao ORC simples (FENG *et al.*, 2015).

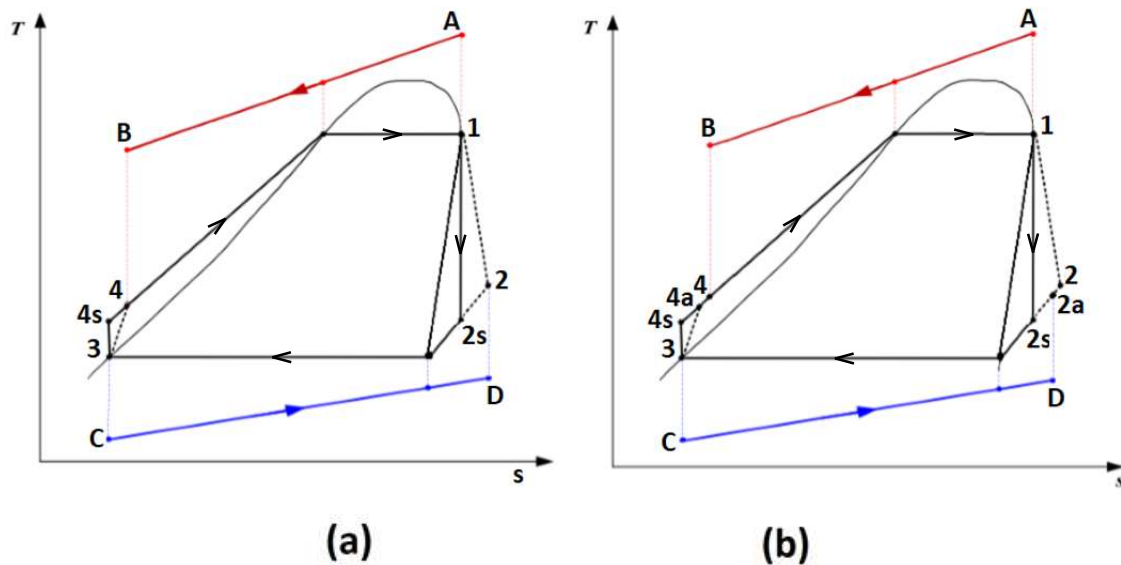
Para permitir a troca térmica entre a saída da turbina e a entrada do evaporador, é necessário incluir um trocador de calor adicional, conhecido como recuperador, (Figura 6-b). Equipamentos adicionais significam maiores custos de aquisição e manutenção, além de maior complexidade da planta. Apesar de ORCs com recuperação apresentarem melhor eficiência que ORC simples, para que sejam interessantes financeiramente, é necessário que exista energia suficiente para extração no fluido, após o processo de expansão.

Figura 6 – Comparação esquemática entre ORC simples (a) e ORC com recuperação (b)



A inclusão do recuperador também altera levemente o diagrama $T-s$, quando em comparação a um ORC simples, conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Comparação diagramas $T-s$ entre ciclos simples (a)/ com recuperação (b)



Fonte: Adaptado de: XI *et al.*, 2015.

Ao passo que um ORC simples apresenta 4 processos, no ORC com recuperação podem ser vistos 6 processos, com a inclusão das etapas 2-2A (rejeição de energia térmica no Recuperador) e 4-4A (absorção de calor pelo fluido na entrada do evaporador). Assim, mantida a vazão do fluido de trabalho, ou seja, sem alteração no consumo de potência da bomba, uma menor quantidade de calor é necessária para elevar o fluido até a temperatura de trabalho, assim como uma menor quantidade de calor é rejeitada no condensador, o que aumenta a eficiência do ciclo. De qualquer forma, assim como foi mencionado anteriormente, deve ser feita análise criteriosa sob aspectos técnicos e econômicos, para que a inclusão do recuperador não impacte negativamente os resultados esperados.

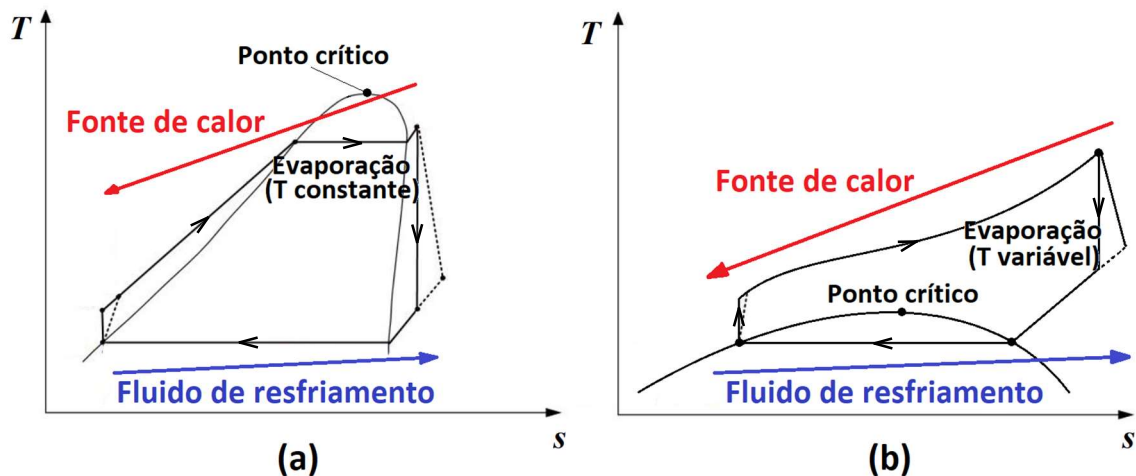
Além dos ciclos com sistemas de recuperação, existem também os ciclos com sistemas de regeneração, que possuem basicamente a mesma função de aumentar a eficiência do ciclo pelo aproveitamento do calor liberado pelo fluido no condensador, ou ainda a partir de extração do fluido aquecido entre estágios da expansão, realizando o pré-aquecimento do fluido antes de entrar no evaporador. Entretanto, sistemas de regeneração não foram abordados no presente estudo.

2.1.1.3 ORC subcrítico e supercrítico

Os ORCs também podem ser classificados quanto às temperaturas e pressões envolvidas nos processos de evaporação, expansão, condensação e compressão (MACCHI; ASTOLFI, 2016). Segundo essa classificação, os ORC podem ser chamados de subcríticos, nos quais os processos ocorrem abaixo da pressão crítica do fluido de trabalho utilizado, e supercríticos, em que os processos ocorrem em pressões acima da pressão crítica do fluido.

De acordo com Lecompte *et al.* (2015), a maior diferença entre esses dois tipos de ciclo se encontra no processo de aquecimento do fluido: nos ciclos subcríticos, o fluido passa pela região líquido-vapor, onde os dois estados físicos coexistem durante a evaporação, que usualmente é assumida como um processo isotérmico. Nos supercríticos, o fluido passa de líquido comprimido diretamente para a fase de vapor superaquecido, sem que os estados físicos coexistam. Essa diferença faz com que os ciclos supercríticos possam ser mais interessantes nos casos de fontes de calor com temperaturas excessivamente baixas, já que o vapor superaquecido tende a gerar maior potência no processo de expansão (YU; XU; SUN, 2015). A Figura 8 apresenta os gráficos T - s para os ciclos subcrítico e supercrítico.

Figura 8 – Diagramas T - s para ORC subcrítico (a) e supercrítico (b)



Fonte: Adaptado de: LE *et al.*, 2014.

Conforme pode ser visto na Figura 8-b, ciclos supercríticos apresentam melhor adequação entre a curva de aquecimento e a fonte quente do ciclo, fazendo com que haja melhor aproveitamento do calor disponível (LE *et al.*, 2014). Além disso, pelo fato de a expansão ocorrer na região de vapor superaquecido, não existe risco de condensação na turbina, permitindo a

utilização de fluidos úmidos (maiores detalhes sobre as classificações do fluido podem ser encontrados a partir do próximo tópico).

Por outro lado, em ciclos supercríticos, podem ser necessárias pressões elevadas, acarretando equipamentos mais robustos, dispositivos adicionais de segurança e aumento dos custos associados ao sistema (VÉLEZ *et al.*, 2012), motivos pelos quais os sistemas ORC subcríticos sejam mais utilizados (LECOMPTE *et al.*, 2015). Por essas razões, visando a caracterização de um ciclo com menores riscos à segurança, com baixos riscos operacionais e com os menores custos possíveis, o presente estudo baseou-se apenas em ciclos subcríticos.

2.1.2 Fluido orgânico

Sob o ponto de vista termodinâmico, os fluidos orgânicos apresentam vantagens inegáveis em relação à água, permitindo que seja extraída energia a partir de fontes de calor de baixas temperaturas, o que seria inviável por meio de Ciclos Rankine convencionais. Por outro lado, também apresentam desvantagens e desafios adicionais, tanto sob o ponto de vista técnico quanto econômico.

De acordo com Nouman (2012), têm sido realizados muitos estudos científicos relativos à seleção do fluido para utilização em ORCs; em sua grande maioria, tais estudos trabalham com simulações e modelos termodinâmicos, abordando essencialmente critérios como eficiência operacional e potência obtida.

A escolha do fluido ideal depende fortemente das temperaturas da fonte quente e da fonte fria (respectivamente, a fonte de calor residual e a água de resfriamento). Entretanto, para cada condição de operação, podem haver diversos fluidos orgânicos que forneçam resultados satisfatórios em termos de eficiência e geração de energia. Assim, outros fatores devem ser levados em consideração, para que possa ser feito o melhor balanço entre os aspectos operacionais, financeiros, ambientais e de segurança.

Ainda segundo Nouman (2012), alguns dos principais aspectos a serem considerados, quando da escolha do fluido de trabalho de um ORC, são apresentados a seguir:

- a) propriedades termodinâmicas e de transferência de calor: o fluido deve ser termoquimicamente estável, mantendo suas propriedades ao longo do tempo de operação; deve possuir boa capacidade de absorção de calor (associados a calor específico, coeficiente de condutividade térmica e de convecção), aumentando a eficiência das trocas térmicas no evaporador e condensador; preferencialmente deve possuir elevada densidade, levando a menores vazões volumétricas e

consequentemente configurações mais enxutas (equipamentos menores, mais baratos e com menor consumo de potência); preferencialmente deve ter baixa viscosidade, minimizando o consumo de potência de bombeamento;

- b) aspectos ambientais: dois dos principais indicadores ambientais associados aos fluidos orgânicos são o potencial de degradação da camada de ozônio (ODP – *Ozone Depletion Potential*) e o potencial de aquecimento global (GWP – *Greenhouse Warming Potential*). Protocolos ambientais têm sido criados no sentido de descontinuar ou banir a utilização de fluidos com elevados riscos ao meio-ambiente. Um fator complicador é a escassez de tais indicadores, já que muitos fluidos ainda não possuem disponíveis os índices de ODP e/ou GWP, fato que se agrava quando se analisam misturas de diferentes fluidos;
- c) fatores de segurança: os principais aspectos abrangidos pelas classificações existentes de fluidos orgânicos são a toxicidade (HH – *Health Hazard*) e a inflamabilidade (FH – *Fire Hazard*). Da mesma maneira que ocorre com os indicadores ambientais ODP e GWP, muitos fluidos ainda não possuem informações disponíveis quanto ao potencial tóxico e propagação de chama, situação também agravada nos casos de misturas de fluidos;

Além dos fatores descritos acima, são fundamentais os aspectos relativos aos custos de aquisição, reposição, transporte e descarte apropriado, além da própria disponibilidade do fluido no mercado. O Quadro 2 apresenta uma comparação qualitativa entre a água e fluidos orgânicos, de maneira geral, em relação aos principais aspectos físicos, operacionais e financeiros.

Quadro 2 – Parâmetros comparativos entre ciclos Rankine.

(continua)

Parâmetro	Ciclo Rankine convencional	ORC
Fluido	Água	Composto orgânico
Pressão Crítica	Alta	Baixa
Temperatura Crítica	Alta	Baixa
Ponto de Ebulição	Alto	Baixo
Pressão de Condensação	Baixa	Aceitável
Calor específico	Alto	Baixo

Quadro 2 – Parâmetros comparativos entre ciclos Rankine.

(conclusão)

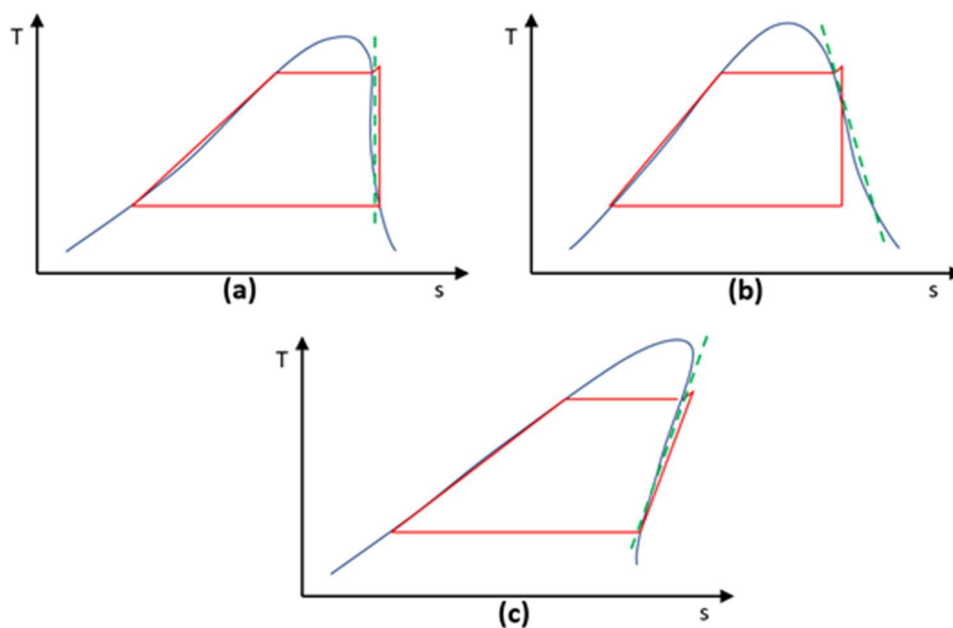
Parâmetro	Ciclo Rankine convencional	ORC
Viscosidade	Baixa	Relativamente alta
Inflamabilidade	Não	Sim, depende do fluido
Toxicidade	Não	Sim, depende do fluido
Impacto Ambiental	Não	Alto e depende do fluido
Disponibilidade	Alta	Problemas de fornecimento
Custo	Barata	Caro

Fonte: adaptado de TCHANCHE *et al.*, 2011.

Ainda como critérios para seleção do fluido, devem ser levadas em consideração as diferentes classificações dos fluidos, que influenciam diretamente o desempenho termodinâmico do ciclo, bem como as condições de operação (temperaturas e pressões nos pontos do ciclo).

Para fins de análise termodinâmica de ORCs, é usual classificar os fluidos quanto ao seu comportamento em um diagrama $T-s$ (LAI; WENDLAND; FISCHER, 2011; HUNG *et al.*, 2010). Os diferentes fluidos orgânicos apresentam formatos distintos para as curvas no diagrama $T-s$, conforme visto na Figura 9. Dessa forma, os fluidos são classificados em isentrópicos, “úmidos” ou “secos”, de acordo com os processos termodinâmicos a eles associados.

Figura 9 – Diagramas $T-s$ para fluidos orgânicos isentrópicos (a), úmidos (b) e secos (c)



Fonte: Adaptado de: QUOILIN, 2011.

O critério para classificação dos fluidos baseia-se na inclinação da curva de saturação de vapor, ou seja, na parte descendente da curva, após o pico, correspondente ao ponto crítico (DESAI; BANDYOPADHYAY, 2009). Na Figura 9, os segmentos verdes tracejados representam a linha de tendência para a inclinação da região de vapor saturado. Fluidos isentrópicos, tais como o R134a (Figura 9-a), apresentam a curva de saturação de vapor praticamente vertical, ou seja, chegam ao final do processo de expansão próximos à região de vapor saturado. Fluidos “úmidos”, como amônia (NH_3), apresentam a curva de saturação inclinada para a esquerda (Figura 9-b), fazendo com que esteja no estado líquido-vapor ao final da expansão. Fluidos “secos”, como Tolueno, por sua vez, apresentam a curva de saturação de vapor inclinada para a direita (Figura 9-c), chegando ao final da expansão como vapor superaquecido (IZIDORO, 2016).

Os diferentes estados físicos ao final do processo de expansão acarretam grandes diferenças em relação à escolha do fluido. No caso dos fluidos úmidos, a presença da fase líquida durante a expansão pode ocasionar danificações na turbina e reduzir sua eficiência. Para que não ocorra a presença de líquido nesse processo, é necessário superaquecer o fluido no processo de evaporação, de modo que não ocorram danos aos equipamentos e evitando redução da eficiência do ciclo (CHEN; GOSWAMI; STEFANAKOS, 2010). Esse superaquecimento demanda temperaturas mais elevadas no evaporador, o que nem sempre é possível nas condições operacionais disponíveis, ou pode vir a demandar maior complexidade das instalações.

Fluidos secos, por sua vez, não apresentam fase líquida ao final da expansão, encontrando-se no estado superaquecido, fazendo com que não haja prejuízos à turbina. De uma forma geral, para uma mesma temperatura de entrada na turbina (pode-se admitir que seja praticamente a temperatura de saída do evaporador), o superaquecimento do fluido implica em um menor valor de pressão, afetando negativamente a energia extraída no processo de expansão (VICTOR; KIM; SMITH, 2013).

Além disso, fluidos que apresentam inclinação excessiva para a direita, ou seja, fluidos excessivamente “secos” podem possuir elevado grau de superaquecimento, ou seja, ao final do processo de expansão ainda possuem energia que não foi completamente extraída na turbina. Em alguns casos, pode ser recomendável a inclusão de mecanismos de recuperação desse calor, eventualmente aumentando a complexidade e os custos das instalações (BAO; ZHAO, 2013).

Fluidos isentrópicos, assim os fluidos secos, geralmente não apresentam fase líquida ao final da expansão e, assim, oferecem poucos riscos operacionais à turbina e em alguns casos não necessitam de superaquecimento para evitar a formação de condensado. Por outro lado,

devido ao baixo ou nenhum nível de superaquecimento, pode não ser viável a instalação de um recuperador de calor após o processo de expansão, restringindo a eficiência máxima do ciclo.

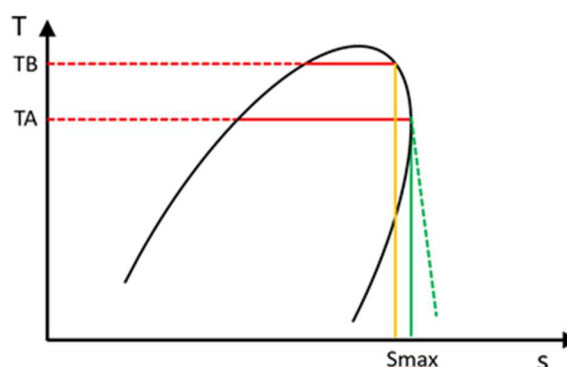
Além da escolha adequada do fluido, variáveis de processo (temperatura, vazão e pressão) e aspectos construtivos dos equipamentos exercem grande influência na potência líquida produzida e na eficiência global do ciclo (SUN; LI, 2011). Para maior eficiência, o ORC deve aproveitar ao máximo a fonte de calor disponível. Tal aproveitamento é diretamente proporcional às eficiências dos equipamentos, às temperaturas das fontes quente e fria e das propriedades físicas do fluido (IMRAN *et al.*, 2014).

Ciclos Rankine Orgânicos operam entre duas pressões distintas: a pressão de evaporação e a pressão de condensação do fluido. A cada um desses valores corresponde um valor médio de temperatura, e a diferença entre esses valores fornece a eficiência máxima teórica do ciclo, conforme a teoria de Carnot (TCHANCHE; PÉTRISSANS; PAPADAKIS, 2014). Assim, quanto maior for essa diferença de temperaturas, maior poderá ser a eficiência do ciclo, segundo o Princípio da Conservação de Energia (1ª. Lei da Termodinâmica). Para isso, busca-se trabalhar com a máxima pressão de evaporação e a mínima pressão de condensação possíveis, de acordo com o fluido e a temperatura disponível do líquido de arrefecimento do condensador.

Dentre as restrições práticas quanto a tais valores de pressão, pode ser citado o risco de entrada de ar no sistema, no caso de a pressão de condensação ser inferior à pressão atmosférica, causando redução da eficiência do ciclo (DESAI; BANDYOPADHYAY, 2009). Assim, recomenda-se que a pressão de condensação seja igual ou superior à pressão atmosférica.

Além disso, é preferível que o fluido chegue à turbina como vapor saturado ou superaquecido, de modo a evitar que haja condensação durante a expansão. A temperatura máxima recomendada é aquela em que o valor da entropia é máximo, de modo que a linha de expansão isentrópica não atravesse o domo de saturação, conforme pode ser visto na Figura 10.

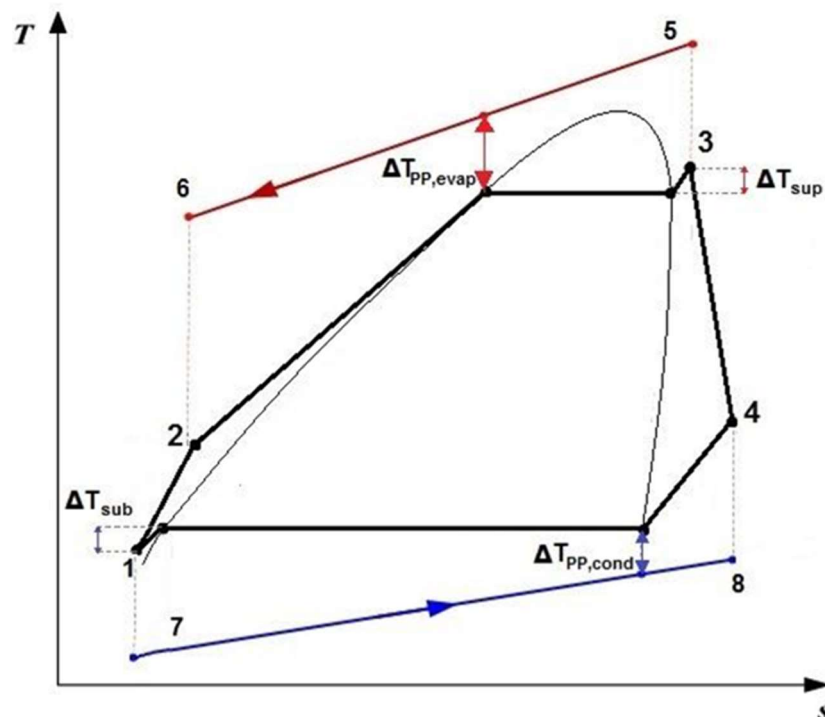
Figura 10 – Temperatura máxima recomendada para um ORC seco ou isentrópico



Na Figura 10, a linha verde correspondente à temperatura T_A no eixo vertical e à entropia s_{max} no eixo horizontal. Temperaturas superiores a essa (por exemplo, T_B) poderão causar condensação e possíveis danos à turbina, uma vez que a linha de expansão atravessará o domo de saturação (linha alaranjada).

Adicionalmente às pressões de evaporação e condensação, outros parâmetros operacionais com grande influência no desempenho do ciclo são a vazão dos gases da fonte quente, vazão do líquido de resfriamento na fonte fria, os *pinch points* dos trocadores de calor (evaporador e condensador), o grau de superaquecimento do fluido após o processo de evaporação (ΔT_{sup}) e o grau de sub-resfriamento após o processo de condensação (ΔT_{sub}), conforme pode ser observado na Figura 11. O *pinch point* de evaporação (PP_{evap}) corresponde à menor amplitude térmica existente entre a fonte de calor e o fluido no evaporador; analogamente, o *pinch point* do processo de condensação (PP_{cond}) corresponde à menor diferença entre as temperaturas da fonte fria e do fluido no condensador (FENG *et al.*, 2015).

Figura 11 – *Pinch points*, graus de superaquecimento e sub-resfriamento



Fonte: Adaptado de: IZIDORO, 2016.

Uma vez definidas as temperaturas da fonte quente e fria, devem-se buscar valores de *pinch point* baixos, fazendo com que a pressão de evaporação aumente e a pressão de condensação diminua, aumentando assim a potência útil do ciclo. No entanto, para reduzir esses

valores, são necessárias maiores superfícies de troca térmica, tanto no evaporador quanto no condensador, aumentando o custo de aquisição e manutenção do sistema (KÖLSCH; RADULOVIC, 2015).

Em situações reais de operação, podem existir perdas ao longo do ciclo, fazendo com que haja redução da temperatura de expansão e conseqüentemente propiciando a formação de condensado na turbina. Para evitar este fenômeno, pode ser necessário um leve grau de superaquecimento no evaporador, de modo a garantir que o fluido chegue ao final do processo de expansão ainda na linha de vapor saturado. Adicionalmente, da mesma forma que a presença de líquido pode ser prejudicial à turbina, a presença de fase gasosa pode ser prejudicial à bomba. Analogamente, para garantir que o fluido deixe o condensador somente na fase líquida, pode ser necessário um leve sub-resfriamento do fluido no processo de condensação.

Deve ser considerada também, como um importante aspecto técnico, a estabilidade química do fluido de trabalho, quando submetido às condições reais de operação. Ou seja, o fluido deve ser resistente a eventual degradação e formação de subprodutos, cujas propriedades físicas podem influenciar negativamente no desempenho do ciclo. Ademais, tais subprodutos podem ser tóxicos e/ou inflamáveis, aumentando os riscos à segurança dos usuários e ao meio-ambiente, principalmente em casos de vazamentos (VÉLEZ *et al.*, 2012).

Por fim, deve-se ter em mente que a eficiência de um sistema equivale à razão entre a energia obtida e a energia necessária ao seu funcionamento. No caso do ORC, um dos elementos que consomem energia, conseqüentemente afetando negativamente a eficiência, é a bomba. É necessário fornecer energia à bomba para que o fluido atinja a pressão de evaporação e consiga percorrer continuamente o ciclo. Um parâmetro usualmente utilizado para mensurar a influência do consumo de energia da bomba na eficiência do ciclo é o *Back Work Ratio* (BWR), que pode ser definido como a parcela da energia produzida pelo ciclo que é consumida pela bomba. Assim, quanto maior o valor de BWR, maior o consumo de energia da bomba em relação à energia produzida pelo ciclo (IZIDORO, 2016).

Quando se aumenta a temperatura de evaporação, buscando maior eficiência do ciclo, ocorre também um aumento de pressão no evaporador, conseqüentemente aumentando a pressão na bomba, e em última instância aumentando o consumo de energia. Outro fator que influencia negativamente o consumo da bomba é a própria viscosidade do fluido, fazendo com que haja maior consumo de potência em caso de fluidos mais viscosos.

Portanto, pode se perceber que a análise técnica de ORC envolve uma grande quantidade de parâmetros, além da própria seleção do fluido de trabalho. Deve-se buscar

equilíbrio entre os valores mais adequados das temperaturas e pressões do sistema, de modo a se chegar a um ciclo que apresente a maior eficiência e os menores custos possíveis.

Além dos aspectos técnicos, fatores ambientais e de segurança também devem ser considerados quando do estudo ou análise de ORCs. Conforme já mencionado, os principais aspectos ambientais são o potencial de aquecimento global (GWP) e o potencial de degradação da camada de ozônio (ODP). Esses parâmetros, GWP e ODP, são inerentes à composição química do fluido, portanto devem ser meticulosamente analisados quando se escolhe o fluido de trabalho de um ORC, servindo como critérios de aceitação ou rejeição. Por exemplo, pode haver fluidos que forneçam excelente desempenho termodinâmico sob determinadas condições, no entanto que oferecem sérios prejuízos ao meio-ambiente.

Em função disso, acordos e tratados internacionais têm sido elaborados para descontinuar ou proibir a utilização de substâncias que apresentem elevados índices de GWP e ODP (VÉLEZ *et al.*, 2012), como, por exemplo, o Regulamento (CE) 2037/2000, cujo escopo abrange fabricantes, fornecedores e usuários envolvidos nos processos de transporte e descarte de substâncias nocivas à camada de ozônio.

Conforme Xi *et al.* (2015), em atendimento ao Protocolo de Montreal, devem ser evitados fluidos com elevados impactos ambientais. Assim, deve-se buscar trabalhar com fluidos que apresentem ODP com valor nulo ou próximo de zero, de modo a garantir o menor impacto possível à camada de ozônio, além de ter garantido seu fornecimento a longo prazo, uma vez que fluidos com ODPs maiores que zero tenderão a ser descontinuados.

Além de riscos à camada de ozônio, substâncias orgânicas também podem contribuir negativamente com o aquecimento global, também chamado de “efeito estufa”, que ocorre quando a radiação infravermelha chega até a superfície da Terra, mas é parcialmente impedida de deixar o planeta, em função do acúmulo de determinados gases na atmosfera. Como parâmetro comparativo para determinação do índice GWP, foi adotado o Dióxido de Carbono (CO₂). Assim, esse índice equivale à razão entre o potencial de aquecimento global de uma determinada substância em comparação ao potencial de aquecimento global de uma massa equivalente de dióxido de carbono, referente a um período de 20, 100 ou 500 anos (BOLAJI; HUAN, 2013), ou seja, foi atribuído o valor de GWP igual a 1,0 para o dióxido de carbono, e a partir disso são determinados os valores GWP das demais substâncias. Assim como acontece em relação ao ODP, deve-se buscar, sempre que possível, fluidos com valores de GWP os mais baixos possíveis, de modo a minimizar impactos ambientais.

Na Tabela 2, são apresentados alguns fluidos orgânicos e seus respectivos valores de ODP e GWP100 (GWP referente ao período de 100 anos), de acordo com a plataforma *CoolProp* (BELL *et. al*, 2014).

Tabela 2 – ODP e GWP100 de alguns fluidos.

Fluido	ODP	GWP
R404A	0	3900
R123	0,02	77
R1233zd(E)	0,02	77
R124	0,022	609
R22	0,05	1810
R142b	0,07	2310
R141b	0,12	725
R115	0,44	7370
R11	1	4750
R113	1	6130
R114	1	10000
R12	1	10900

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Conforme pode ser visto na Tabela 2, alguns fluidos podem apresentar valores satisfatórios de ODP e, simultaneamente, valores muito elevados de GWP100. Para fins de orientar a escolha de fluidos orgânicos, o Protocolo de Montreal estabelece valor zero para ODP, no entanto não existe uma definição exata quanto aos valores de GWP. A UNEP (*United Nation Environment Programme*) propôs uma classificação quanto ao GWP100 dos fluidos orgânicos, conforme Tabela 3 (UNEP, 2018).

Tabela 3 – Classificação do GWP100 de fluidos orgânicos.

Classificação de risco	Valor de GWP100
Extremamente baixo	abaixo de 30
Muito baixo	de 30 a 100
Baixo	de 100 a 300
Moderado	de 300 a 1.000
Alto	de 1.000 a 3.000
Muito alto	de 3.000 a 10.000
Extremamente alto	acima de 10.000

Fonte: Adaptado de UNEP, 2018.

Conforme mencionado, são muito importantes os aspectos ambientais em sistemas térmicos, como é o caso dos ORCs. Também são de fundamental importância os aspectos relativos à segurança operacional, principalmente quanto aos quesitos inflamabilidade e toxicidade. Alguns fluidos, além de apresentarem elevados valores de GWP e ODP, podem ser também tóxicos e inflamáveis (QUOILIN *et al.*, 2013).

De acordo com Vélez *et al.* (2012), para que não haja riscos de contaminação em caso de vazamentos ou derramamentos, é interessante que o fluido não seja tóxico. Além disso, é interessante também que o fluido não seja corrosivo, evitando assim danificações ao sistema, e que não seja inflamável, o que pode causar eventuais acidentes.

Como critério para determinação de inflamabilidade, foi criado o parâmetro LFL (*Low Flammability Level*, ou Limite Inferior de Inflamabilidade), que é a menor concentração que uma substância necessita para entrar em combustão, sob determinada temperatura e pressão. Assim, quanto menores os valores de LFL, maior a tendência de um composto se queimar, potencialmente oferecendo condições inseguras, especialmente em caso de vazamentos e/ou durante manuseio e transporte.

Em relação à toxicidade, a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*), ou Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) criou uma tabela alfanumérica para classificar os fluidos orgânicos, composta de uma letra (A ou B, onde A significa baixa toxicidade, e B significa elevada toxicidade) e um número (1, 2 ou 3, onde 1 significa ausência de propagação de chama,

2 significa baixa propagação de chama, e 3 significa elevada propagação de chama (ASHRAE, 2019). Adicionalmente, a letra L após a numeração indica dificuldade do fluido em iniciar a queima, associada a um baixo ponto de ignição (por exemplo, A2L ou B2L). A Figura 12 mostra a classificação quanto à segurança operacional dos fluidos, de acordo com a norma ASHRAE 34.

Figura 12 – Classificação da ASHRAE 34 em relação à segurança dos fluidos

		GRUPO DE SEGURANÇA	
Aumento da inflamabilidade ↑	Inflamabilidade Alta	A3	B3
	Inflamabilidade Baixa	A2 A2L*	B2 B2L*
	Sem propagação de chama	A1	B1
		Toxicidade Baixa	Toxicidade Alta
		Aumento da toxicidade →	

* Grupos A2L e B2L incluem os refrigerantes de baixa inflamabilidade com velocidade máxima de queima de 10 cm/s.

Fonte: Adaptado de ASHRAE, 2019.

Pela análise dos fatores expostos anteriormente, é possível concluir que devem ser evitados fluidos nocivos à segurança ou ao meio-ambiente. Porém, alguns dos fluidos que apresentam bons resultados em termos de desempenho do ciclo oferecem maiores riscos à segurança (elevada inflamabilidade e/ou elevada toxicidade, por exemplo) ou ao meio ambiente. Quando da utilização de fluidos com maiores riscos, devem ser adotadas medidas mais severas quanto à prevenção de acidentes, tais como sistemas robustos de monitoramento, controle e segurança, capacitação dos envolvidos, cuidados especiais no transporte, etc.). Além disso, nota-se a importância quanto ao desenvolvimento de novos fluidos, que consigam oferecer melhor desempenho termodinâmico, associado a cada vez menores riscos ambientais e à segurança.

2.1.3 Fabricantes de Sistemas ORC

De acordo com Quoilin *et al.* (2013), existem no mercado diversos fabricantes de sistemas ORC, abrangendo diversas faixas de potências e temperaturas; alguns deles já possuem

razoável portfólio de instalações ao redor do mundo. A Tabela 4 apresenta as faixas de operação dos principais fabricantes de sistemas ORC existentes no mercado.

Tabela 4 – Principais fabricantes de ORC e faixas de operação.

Fabricante	País	Potência (kW)	Temperatura (°C)
Adoratec/Maxxtec	Alemanha	315 – 1.600	300
Barber Nichols	EUA	700 – 2.700	>115
Bosch KWK	Alemanha	65 – 325	120 – 150
Cryostar	França	500 – 15.000	100 – 400
Electratherm	EUA	30 – 50	>88
Eneftech	Suíça	5 – 30	120-200
Enertime	França	300 – 5.000	200
Enogia	França	5 – 100	80-500
Exergy	Itália	>100	80 – 350
Freepower	Inglaterra	120	>110
GE Clean Cycle/ Calnetix	EUA	125	>120
GMK	Alemanha	50 – 5.000	120-350
Infinity Turbine	EUA	10 – 250	90-120
LTI Reenergy	Alemanha	30	>160
Opcon	Suécia	350 – 800	<120
Ormat	EUA	200 – 70.000	150 – 300
Phoenix	Austrália	10 – 5.000	80 – 900
Pratt & Whitney Systems	EUA	280	90 – 150
Rank	Espanha	2 – 100	80 – 140
Transpacif	EUA	100 – 5.000	<480
Tri-o-gen	Holanda	60 – 160	>350
Turboden	Itália	200 – 2.000	100 – 300
Zuccato Energy	Itália	50 – 150	94 – 160

Fonte: Adaptado de PERIS *et al.*, 2015b.

Destaca-se, dentre os fabricantes listados na Tabela 4, a empresa Turboden, fundada em 1980, que, assim como a empresa Ormat, atua exclusivamente no setor de energias

renováveis. A Turboden tem evoluído as aplicações de seus sistemas ORC, focando em instalações a baixas temperaturas (entre 1980 e 1997); entre 1998 e 2000, concentrou-se em sistemas com temperaturas médias, na faixa de 300°C. A partir do ano 2000, a empresa passou por significativo crescimento no setor de biomassa, tornando-se líder mundial em sistemas ORC baseados nessa tecnologia. De 2011 em diante, a Turboden tem expandido seu leque de opções e aumentado a potência de seus sistemas, alcançando mais de 5MW, consolidando-se como uma das maiores empresas fabricantes de soluções baseadas em ORC (MACCHI; ASTOLFI, 2016).

Sistemas ORC, conforme foi mencionado anteriormente, podem abranger diversas fontes de calor (solares, geotérmicas, calor residual de compressores, entre outras), com diferentes configurações e tamanhos, conforme pode ser visto nas Figuras 13 a 15.

Figura 13 – ORC de 6,5 MW para compressores (Ormat).



Fonte: MACCHI; ASTOLFI, 2016.

Figura 14 – ORC geotérmico de 5,6 MW (Turboden).



Fonte: MACCHI; ASTOLFI, 2016.

Figura 15 – ORC de 900 kW para siderúrgica (Exergy).



Fonte: MACCHI; ASTOLFI, 2016.

Conforme apresentado, existe grande variedade de sistemas ORC, quando analisados critérios como potência gerada, temperatura e origem da fonte de calor, tecnologia empregada no processo de expansão, fluido de trabalho utilizado, entre outros (TCHANCHE *et al.*, 2014). Entretanto, de acordo com Quoilin *et al.* (2013), a maioria das plantas existentes baseia-se em ciclos ORC simples ou com recuperação, subcríticos, pressão de evaporação única e fluidos de trabalho puros. Além disso, percebe-se que os maiores fabricantes de ORC são estrangeiros, o que tende a impactar negativamente investimentos nesse tipo de sistema para utilização em território nacional, visto que os impostos e taxas de importação costumam representar valores elevados.

2.2 Desenvolvimento Sustentável na Recuperação de Calor Residual

Ciclos Rankine Orgânicos, que são o objeto do presente estudo, permitem a geração de eletricidade a partir de uma energia que seria inicialmente descartada para a atmosfera. Nesses casos, a rejeição de calor pode causar impactos ambientais relacionados ao aquecimento global direto, uma vez que são expelidos gases de exaustão como o CO₂, e, de maneira indireta, por meio do descarte da energia térmica não utilizada, que foi gerada a partir do consumo de recursos naturais.

A busca pela redução de impactos ambientais tem sido amplamente discutida nas últimas décadas, especialmente em função do aumento no consumo de energia e na emissão de gases de efeito estufa, como o próprio CO₂ (DALAL-CLAYTON; BASS, 2002). A redução desses impactos tende a contribuir para o desenvolvimento sustentável, que, apesar de ser um termo muito abrangente e com diversas abordagens e definições, pode ser entendido como a sobrevivência da espécie humana a longo prazo, com qualidade de vida além da simples sobrevivência biológica, por meio da manutenção da biosfera e da existência de infraestrutura e instituições para sua distribuição e proteção das condições de vida (LIVERMAN *et al.*, 1988).

Vale ressaltar, portanto, que a Sustentabilidade se fundamenta do desenvolvimento de três “pilares”: além dos aspectos biológicos/atmosféricos já mencionados, deve ser levado em consideração também, o desenvolvimento sob os aspectos social e econômico (GARCÍA-SERNA; PÉREZ-BARRIGÓS; COCERO, 2007).

Quando se fala em desenvolvimento econômico, sob o ponto de vista empresarial, deve haver atratividade financeira quando da análise de sistemas de reaproveitamento de calor, especialmente em grande escala, uma vez que requerem investimentos elevados, por envolver equipamentos complexos e de grande porte. Devem ser consideradas as opções de investimento disponíveis, a legislação ambiental vigente e as condições político-econômicas vigentes. A partir de todo o cenário disponível, são aplicadas técnicas para análise financeira dos investimentos, assunto abordado a partir do próximo tópico.

2.3 Análise econômica e financeira de projetos

De acordo com Assaf Neto (2014), o principal objetivo de qualquer empresa é a maximização da riqueza de seus acionistas, que são aqueles que assumem os riscos e incertezas dos negócios. Para isso, a empresa deve criar mais fluxo de caixa do que utiliza (ROSS *et al.*, 2016). Uma das formas de alcançar tal objetivo seja alcançado é a aplicação de recursos em projetos de investimento, cujo retorno financeiro deve remunerar o capital aplicado, acrescido de um prêmio pelo risco assumido.

São frequentes os casos em que as empresas se veem diante de diversas opções para investimento de seus recursos. Diferentes projetos podem ter diferentes Taxas Internas de Retorno (TIR), diferentes tempos de vida ou diferentes fluxos de caixa, o que pode dificultar a análise financeira.

Decisões financeiras de investimentos devem ser tomadas com base na administração financeira, cuja principal função é embasar adequadamente a aplicação dos recursos das

empresas (DAMODARAN, 2004), evitando assim decisões precipitadas e subjetivas, que poderiam colocar em risco a própria sobrevivência da empresa.

A avaliação financeira de projetos de investimentos é um “processo geralmente composto pelas etapas de projeção dos fluxos de caixa, seguida pelo cálculo do custo de capital e posteriormente pela aplicação de métodos de avaliação” (BRUNI, 2008, p. 228). Ainda assim, é importante destacar que existem fatores estratégicos envolvidos nos processos decisórios, fazendo com que nem sempre as decisões sejam tomadas exclusivamente por meio dos métodos teóricos de avaliação (ASSAF NETO, 2014).

Diferentes tipos de investimento podem demandar diferentes critérios para tomada de decisão. De acordo com Souza e Clemente (2009), os projetos de investimentos podem ser classificados em três tipos:

- a) Mutuamente exclusivos, quando a seleção de um deles automaticamente elimina a seleção dos demais, geralmente tendo como critério de escolha o maior Valor Presente Líquido (VPL). Por exemplo, uma empresa que se depara com a possibilidade de investir em um sistema para aproveitamento de energia térmica residual por meio de ORC ou por meio de um ciclo Kalina; A aquisição de uma opção necessariamente implicaria na não aquisição da outra;
- b) Independentes, quando a seleção de um projeto não necessariamente eliminaria a seleção de outro(s), dentre as opções existentes. Geralmente é utilizado como critério todo e qualquer projeto que possua VPL positivo. Por exemplo, uma empresa poderia ter como opções de investimento a implantação de um sistema para aproveitamento de energia térmica residual por meio de ORC e de novos caminhões para a frota: a aquisição do sistema ORC não necessariamente impediria a aquisição dos caminhões;
- c) Dependentes, quando a seleção por algum projeto possa interferir nos demais projetos disponíveis. Esta situação pode ocorrer em casos de investimento em acessórios para equipamentos (por exemplo, a aquisição de implementos agrícolas pode só fazer sentido no caso da aquisição de um trator), ou em casos de restrição orçamentária (a aquisição de um ativo acaba comprometendo a verba disponível para os demais projetos). Assim, deve ser feita priorização dentre os projetos de investimento existentes, tendo como premissas os recursos disponíveis, VPL e Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

Diferentes situações encontradas quando da análise de projetos de investimento podem demandar diferentes métodos para análise econômica e financeira, muitas vezes utilizados

em conjunto. A partir do próximo tópico, são apresentados os principais métodos utilizados por analistas de investimento, como embasamento para tomada de decisões.

2.3.1 Métodos de análise econômica e financeira

A análise econômica e financeira de possíveis projetos de investimento envolve a determinação do retorno financeiro e dos riscos envolvidos em cada um desses projetos. Propostas de investimento tornam-se interessantes à medida em que o retorno obtido for superior às taxas demandadas pelos proprietários do capital investido, em termos de remuneração financeira (ASSAF NETO, 2014).

Dentre os possíveis indicadores financeiros para análise de projetos de investimentos, podem ser mencionados o Valor Presente Líquido (VPL), associado aos ganhos, ou seja, à geração de riqueza, e o *Payback*, associado aos riscos. Maiores riscos normalmente implicam na expectativa de maiores ganhos financeiros (SOUZA; CLEMENTE, 2009).

Salienta-se que, no mercado financeiro, sempre haverá fatores de incerteza, seja pelo cenário político-econômico, seja por outros fatores externos, de modo que os resultados gerados pelos métodos de análise econômica e financeira servem apenas como indicativos quanto à viabilidade e atratividade de cada projeto. Assim, para permitir melhores tomadas de decisão, diversos indicadores costumam ser analisados simultaneamente. Além disso, todo método de análise econômica e financeira de investimentos possui vantagens e desvantagens, estimulando ou limitando sua aplicação em determinadas situações.

A partir do próximo tópico, foram apresentados, em maiores detalhes, os indicadores financeiros utilizados para desenvolvimento do produto técnico proposto no presente trabalho.

2.3.1.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O Método do Valor Presente Líquido consiste em calcular o valor presente (VP) dos termos do fluxo de caixa, somando-os ao investimento inicial, para cada alternativa de investimento. Nesse caso, utiliza-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para o cálculo do VP, e opta-se pela alternativa que apresentar o maior VPL (CASSAROTO FILHO; KOPITTKKE, 1998). Ou seja, esse método baseia-se na somatória do fluxo de caixa, descontado para a data atual (BRUNI, 2008), tendo como parâmetro a TMA.

Para construção dos fluxos de caixa, são calculados os valores periódicos das receitas e despesas relativas à atividade de investimento (ASSAF NETO, 2014). No caso de sistemas de

reaproveitamento de calor, como é o caso do ORC, a receita pode ser assumida como a economia anual obtida pela geração de eletricidade, enquanto as despesas podem ser assumidas como os custos anuais de operação e manutenção (O&M), ambas relativas ao período estipulado de vida útil do sistema.

Para cálculo do VPL, utiliza-se a expressão 2.1:

$$VPL = -CF_0 + \sum_{n=1}^t \frac{CF_n}{(1 + TMA)^n} \quad (2.1)$$

Onde:

CF_0 : valor do fluxo de caixa no momento inicial, ou seja, corresponde ao capital investido;

CF_n : valor de cada incremento do fluxo de caixa, a partir do primeiro período;

n : número de períodos;

TMA : Taxa Mínima de Atratividade.

Os valores obtidos pelo método do VPL fornecem um indicativo quanto à atratividade dos projetos analisados, mesmo com períodos de duração diferentes. Alternativas que forneçam VPL negativos devem ser evitadas, uma vez que fornecem retorno inferior àqueles encontrados no mercado financeiro (que por sua vez determinam a TMA); VPL positivos, por outro lado, indicam que o retorno é superior ao potencialmente obtido no mercado financeiro, sendo, portanto, interessantes; quando da situação de análise de múltiplas opções, deve-se investir naquela que apresentar o maior VPL. Ainda assim, os VPL são valores correspondentes ao projeto como um todo; para análise e comparação dos resultados anuais, deve-se recorrer a outros métodos de avaliação, tais como o CAUE (Custo Anual Uniforme Equivalente).

Vale ressaltar que a TMA, de acordo com Souza e Clemente (2009), corresponde à melhor taxa disponível para aplicação do capital em análise, associada a baixo risco, ou seja, geralmente opta-se por não investir em projetos que apresentem VPL nulo, uma vez que os riscos envolvidos são normalmente maiores do que aqueles associados às opções disponíveis no mercado financeiro. A TMA pode ser assumida como o valor das taxas de juros do mercado, acrescidas de um percentual adicional em função do risco assumido, e incide exclusivamente sobre o capital próprio.

Uma vez que os recursos financeiros para investimentos podem ter origem em fonte própria e não própria de capital, é importante também determinar o Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC), que leva em consideração as parcelas relativas ao capital próprio e de terceiros, assim como a taxa de juros (ASSAF NETO, 2014). O CMPC é também conhecido como Custo Total de Capital (na sigla em inglês, WACC – *Weighted Average Cost of Capital*), e pode ser calculado pela expressão 2.2.

$$CMPC = TMA \cdot CP + i \cdot CT \quad (2.2)$$

Em que:

CP: Parcela do investimento paga com capital próprio;

i: Taxa de juros;

CT: Capital de terceiros.

O método do VPL é uma técnica robusta e amplamente utilizada, principalmente pelo fato de fornecer informações sobre o aumento do valor da empresa, como resultado das decisões de investimentos, além de considerar os fatores de custo de capital e risco das alternativas de investimento. Além disso, o VPL analisa todos os fluxos de caixa do projeto (BRUNI, 2008).

Ainda de acordo com Bruni (2008), as principais desvantagens do método do Valor Presente Líquido estão no fato de os resultados serem expressos em termos absolutos, ou seja, não fornece indicativo percentual do retorno em função do valor investido; além disso, demanda o conhecimento prévio da Taxa Mínima de Atratividade, sem a qual torna-se mais difícil decidir por investir em algum projeto ou investir em opções de baixo risco no mercado financeiro.

Além disso, Assaf Neto (2014) também ressalta que a utilização do método do VPL pressupõe que os fluxos intermediários do fluxo de caixa sejam reinvestidos na taxa de desconto utilizada quando da avaliação do investimento, neste caso, a taxa mínima aceitável para decisão quanto ao investimento.

2.3.1.2 *Payback*

De acordo com Assaf Neto (2014), *Payback* é o período de tempo necessário para que haja retorno do capital investido, considerando-se que no fluxo de caixa haja benefícios incrementais líquidos oriundos em função do investimento realizado.

Para determinação do *Payback*, devem ser geradas as entradas do fluxo de caixa, relativas ao projeto de investimento, de modo a identificar em qual período o valor acumulado torna-se positivo. No caso do investimento em um sistema de geração de eletricidade por meio do reaproveitamento do calor residual, os incrementos periódicos correspondem à economia obtida com a redução do consumo energético em relação à concessionária.

Segundo Bruni (2008), o método do *payback* apresenta vantagens como simplicidade de aplicação e facilidade de interpretação dos resultados. Além disso, a partir dele é possível ter uma ideia sobre aspectos como risco e liquidez, uma vez que, quanto maior o tempo de *payback*, menor é a certeza do retorno efetivo do investimento e menor é a liquidez.

Por outro lado, a principal desvantagem do *payback* é o fato de ser meramente uma estimativa para tempo de retorno, sem fornecer qualquer informação sobre a rentabilidade do investimento. Além disso, nele não são considerados todos os capitais do fluxo de caixa (BRUNI, 2008). Isso faz com que haja tendência de que projetos com menores prazos de retorno sejam mais aceitos, mesmo com menor rentabilidade, do que projetos mais longos, porém mais rentáveis, em função das mudanças contínuas e acentuadas no cenário econômico (SOUZA; CLEMENTE, 2009). Por fim, deve-se salientar que este método não leva em consideração as magnitudes e a distribuição do fluxo de caixa antes, nem tampouco após o período de *payback* (ASSAF NETO, 2014).

2.3.1.3 Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

Em muitas situações, pode ser necessário decidir entre projetos de investimentos com vidas diferentes, ou seja, com fluxos de caixa com diferentes números de entradas futuras. Nesses casos, principalmente nos casos de horizontes de planejamento longos, o método do VPL não é o mais indicado para comparação dos projetos, considerando-se que será adequado, nesse caso, analisar em termos de resultados por período, ao invés de comparar resultados acumulados ao longo de longos períodos de tempo (SOUZA; CLEMENTE, 2009). Logo, acaba sendo necessário ajustar os fluxos para a mesma base comum, geralmente anual.

Para ajustar os fluxos de caixa para base anual, um dos métodos mais adequados é o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), especialmente no caso de ser necessário considerar custos de instalação, manutenção, valor de revenda ou residual, como no foco do presente estudo.

Pode-se dizer que o CAUE consiste em calcular a série uniforme equivalente a todas as entradas e saídas do fluxo de caixa de um projeto, tendo como base a TMA (CASSAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 1998), ou seja, é uma variação do VPL, já que, ao invés de concentrar

todos os valores do fluxo de caixa na data inicial do projeto, calcula-se uma série uniforme que fornece o valor anual médio do projeto (SOUZA; CLEMENTE, 2009). De maneira geral, calcula-se o CAUE pela expressão 2.3:

$$CAUE = CA + CO - VR \quad (2.3)$$

Em que:

CA: Custos de aquisição, em base anual;

CO: Custos anuais de operação e manutenção;

VR: Valor residual ao final da vida útil.

Salienta-se, portanto, que a principal vantagem do método do CAUE está na possibilidade de comparação entre projetos de investimento com vidas diferentes, já que traz como resultados os valores ajustados anualmente, assim como um indicativo da geração de riqueza anual da empresa. Dessa forma, opta-se por investir no projeto que traga maiores ganhos anuais (maior VPL), ou seja, que apresente os menores custos anuais (menor CAUE).

No contexto proposto no presente trabalho, uma vez que não foram comparadas diferentes opções de investimento, o CAUE teve como principal aplicação o cálculo do Custo Nivelado de Energia (LCOE – *Levelized Cost of Energy*). O LCOE corresponde ao custo de cada kWh produzido pelo ORC, sendo calculado por meio da expressão 2.4, em que EE_{prod} equivale à energia produzida.

$$LCOE = \frac{CAUE}{EE_{prod}} \quad (2.4)$$

2.3.2 Depreciação e Valor residual

No caso de máquinas e equipamentos industriais, que normalmente são classificados como ativos permanentes das empresas (como é o caso de um sistema de recuperação de calor como o ORC), a Depreciação pode ser definida como as perdas financeiras decorrentes do desgaste pelo tempo uso (ASSAF NETO, 2014), ou ainda em função da obsolescência frente a tecnologias mais recentes. Assim, a perda gradual de valor de mercado se transforma em despesas, ainda que não desembolsáveis.

Uma vez que sistemas ORC são projetados e fabricados sob medida para cada caso particular, implicando inclusive alterações na infraestrutura da planta, costuma não ser considerada a venda futura do sistema. Assim, uma vez que um ORC passa a fazer parte da planta, após aquisição, instalação e início de funcionamento, assume-se que não haverá descomissionamento e desmontagem futura, para fins de revenda. Assaf Neto (2014) salienta que, para serem considerados como imobilizados (um dos tipos de ativo permanente das empresas), os bens devem possuir duração bastante longa, não se destinarem a venda e serem utilizados nas operações associadas aos negócios das empresas, como é o caso de ciclos de potência como o ORC.

Em muitos artigos científicos, tais como em Liu *et al.* (2013), Blanco, Ochoa e Forero (2020), Uusitalo *et al.* (2016) e Stoppato e Benato (2020), é comum que a vida útil de sistemas ORC seja assumida entre 15 a 20 anos. Portanto, por ser um período relativamente longo, ao final do qual não haverá revenda do imobilizado, pode-se considerar que o valor residual seja nulo para fins de análise financeira. Esse fato simplifica, entre outras coisas, o cálculo dos Custos Anuais Uniformes Equivalentes, conforme visto anteriormente. Na próxima seção, no tópico Modelo Financeiro, foram explicados em detalhes os cálculos realizados para análise de viabilidade financeira do ORC proposto neste trabalho.

3 METODOLOGIA

Conforme foi mencionado anteriormente, a presente dissertação tem como principal objetivo analisar técnica e financeiramente sistemas para geração de eletricidade a partir da recuperação da energia térmica liberada na atmosfera, oriunda do calor excedente gerado em diversos processos industriais, em regime permanente. Para realização dessa análise, foi realizada fundamentação teórica sobre ciclos termodinâmicos e análise de investimentos, de modo a determinar os principais requisitos para a construção da planilha eletrônica, que, dessa forma, cumpre o papel do produto técnico requerido em Programas de Mestrado Profissional, como é o caso do MPSTA do IFMG *Campus Bambuí*.

Antes de coletar os dados necessários para desenvolvimento da ferramenta e simulação dos cenários propostos, foram formuladas as equações que representam os processos termodinâmicos inerentes a um ORC. Tais equações se basearam no balanço de energia de 1ª Lei da Termodinâmica, associadas a condições de contorno e premissas, assumidas a partir de critérios técnicos, operacionais e financeiros, conforme detalhado nos tópicos 3.1 (Modelo Técnico) e 3.2 (Modelo Financeiro).

A partir das equações e premissas estabelecidas, foram coletados dados secundários na plataforma *CoolProp*, que forneceu as propriedades termodinâmicas dos fluidos orgânicos utilizados no ORC, e em plataformas institucionais (*websites* de organizações privadas e governamentais), que permitiram a obtenção de valores de taxas de juros, taxas e impostos de importação, fatores de correção de custos, câmbio e preços do kWh (*kilowatt-hora*), dentre outros. Para estimativa dos custos de aquisição e instalação do ORC, foram adotados métodos consagrados, tais como o MCT (*Module Costing Technique*), cujos fatores e parâmetros encontram-se tabelados em bibliografia amplamente utilizada, tal como em Turton *et al.* (2018).

De posse das características técnicas do ORC e dos valores de aquisição e operação, foram escolhidos métodos para análise de investimento e determinação da viabilidade financeira quanto à implantação do sistema proposto, tais como a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e o *Payback* simples, de modo a atingir o objetivo proposto no presente trabalho.

Para compreensão das etapas de desenvolvimento deste estudo, criou-se o seguinte esquema metodológico (Quadro 3), que define as atividades que realizadas para cumprimento dos objetivos propostos.

Quadro 3 – Esquema metodológico do presente estudo.

(continua)

Etapa	Atividade	Informações	O que foi tratado e analisado	Coleta
1	Pesquisa bibliográfica	Revisão de literatura sobre ORCs; viabilidade financeira, custos e investimentos.	Principais características de funcionamento e aspectos técnicos e econômicos envolvidos em ORC.	Livros, teses, dissertações, artigos de revistas indexadas (CAPES) sobre o tema (dados secundários).
2	Modelagem técnica e financeira	Elaboração das equações para implementação das funções necessárias na planilha.	Premissas e hipóteses para definição das variáveis e condições de contorno. Modelos utilizados (por exemplo, MCT – <i>Module Costing Technique</i> , para estimativa de custos de equipamentos).	Livros, teses, dissertações, artigos de revistas indexadas (CAPES) sobre o tema. <i>Websites</i> institucionais e governamentais (dados secundários).
3	Criação da planilha geral	Estruturar a planilha e criar as fórmulas e funções para preenchimento dos dados de entrada, cálculo e exibição dos resultados.	Propriedades termodinâmicas em todos os pontos do ciclo, assim como vazões, potência, eficiência, quantidade de energia produzida, valor do investimento, VPL, Payback e economia gerada, além de outras informações que serão verificadas a partir da revisão de literatura e modelagem matemática. Base de dados <i>CoolProp</i> (propriedades termodinâmicas de fluidos).	Dados operacionais (temperaturas, vazões e regime de trabalho) e financeiros (despesas com energia elétrica, taxas e impostos). Dados primários.

Quadro 3 – Esquema metodológico do presente estudo.

(conclusão)				
Etapa	Atividade	Informações	O que foi tratado e analisado	Coleta
4	Aplicação da planilha	Inserção na planilha de informações para simulação de cenários. Teste da planilha e geração de possíveis cenários de viabilidade financeira do sistema ORC para geração de energia elétrica.	Valores estimados de produção de eletricidade, eficiência do ciclo, aquisição, instalação, operação e manutenção do sistema; obtenção dos custos anuais equivalentes uniformes e do prazo aproximado para retorno do investimento.	Dados operacionais (temperaturas, vazões e regime de trabalho) e financeiros (despesas com energia elétrica, taxas e impostos). Dados primários.
5	Ajustes na planilha	Formatação, criação de instruções de utilização, implementação de rotinas à prova de erro, sinalização gráfica e gestão visual, otimização da interface com o usuário, robustez da planilha e documentação das versões e atualizações da planilha.	Instruções gerais para uso da planilha, na própria interface com o usuário, além de arquivo à parte com instruções mais detalhadas e contextualizadas.	Não se aplica.

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Os dados foram coletados conforme a etapa de desenvolvimento da pesquisa, de acordo com o Quadro 3. Foram gerados dados de processo como temperaturas, pressões, vazões e regime de trabalho, bem como dados financeiros envolvendo consumo de energia elétrica, valor do kWh, taxa de câmbio e impostos, entre outros.

Assim, a produção técnica final deste trabalho foi uma ferramenta computacional para apresentação de cenários de viabilidade técnica e financeira de reaproveitamento térmico

para geração de eletricidade própria, por meio de ORC, para empresas com descarte de calor residual, tais como siderúrgicas, mineradoras ou fábricas de cal e cimento, entre outras. A utilização dessa ferramenta se torna mais interessante em empresas já consolidadas, que eventualmente já possuam sistemas de cogeração ou reaproveitamento das elevadas temperaturas de saída de fornos e caldeiras, de modo a ter como fonte de calor os gases residuais lançados à atmosfera a baixas temperaturas.

Essa ferramenta foi desenvolvida no programa Microsoft Excel® 2016, tornando desnecessário adquirir programas adicionais e muitas vezes pouco amigáveis, tais como MATLAB® ou *Python*, que, apesar de muito poderosos, podem demandar certa familiaridade com ambientes de programação de alto nível e são pouco conhecidos do público alvo a quem se destina este trabalho.

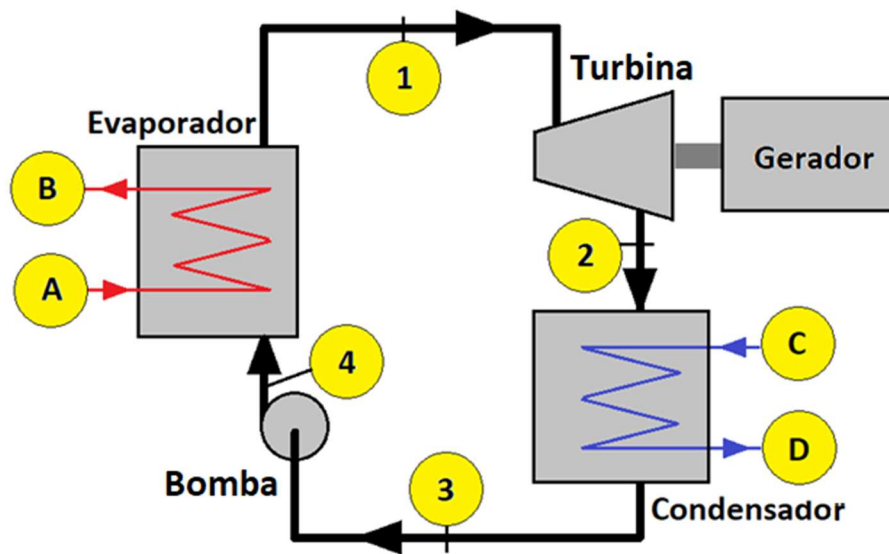
Na próxima seção, foram apresentados os passos realizados para construção do modelo técnico, que embasou a elaboração da planilha de cálculos.

3.1 Modelo Técnico

Para a elaboração da ferramenta proposta, foi necessário incorporar ao Microsoft Excel um complemento chamado *CoolProp*, que contém funções específicas para cálculos termodinâmicos e uma biblioteca com propriedades de fluidos orgânicos. Vale ressaltar que o *CoolProp* é gratuito e possui instalação simples, com instruções detalhadas no manual do usuário fornecido juntamente com a planilha, possibilitando a utilização da ferramenta até mesmo por usuários pouco experientes.

Inicialmente, foi necessário modelar o ciclo termodinâmico, adotando um ORC de configuração básica, composto por evaporador, turbina, condensador e bomba. Para fins de cálculos e identificação das grandezas envolvidas, foram adotados pontos no ciclo, possibilitando nomear os processos termodinâmicos e as propriedades termodinâmicas em cada etapa do ciclo, conforme pode ser visto na Figura 16, onde os pontos e processos por onde circula o fluido orgânico são denominados por números, enquanto os pontos e processos por onde circulam os gases quentes e a água de resfriamento são denominados por letras do alfabeto.

Figura 16 – Representação do ciclo ORC com pontos e processos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.1.1 Seleção dos Fluidos

Antes de serem trabalhadas as equações termodinâmicas, foi necessário fazer uma pré-seleção dos fluidos de trabalho existentes na biblioteca interna do *CoolProp*, visto que fluidos de diferentes tipos (úmidos, isentrópicos e secos) apresentam comportamento muito diferentes entre si, o que influencia na estratégia para obtenção das propriedades termodinâmicas em cada ponto do ciclo.

Dessa forma, foram estabelecidos alguns critérios para seleção dos fluidos:

- uma vez que misturas de fluidos podem gerar temperaturas de evaporação e condensação não uniformes, haveria grande aumento da complexidade das equações e cálculos necessários, sem necessariamente trazer opções significativamente melhores para os resultados apresentados ao usuário. Dessa forma, foram considerados apenas os fluidos disponíveis na biblioteca do *CoolProp*, excluindo-se as inúmeras possibilidades de misturas de fluidos, assumindo constantes as temperaturas de evaporação e condensação;
- foram excluídos os fluidos cujas temperaturas críticas estivessem abaixo de 100 °C, de modo a permitir ciclos subcríticos dentro da faixa de temperatura de operação estipulada. A utilização de ciclos subcríticos foi uma das premissas adotadas para que sejam utilizadas pressões mais baixas, reduzindo o tamanho e a complexidade dos equipamentos utilizados, conforme descrito no tópico 2;

- c) em relação aos aspectos ambientais, foram excluídos os fluidos que apresentam GWP100 (*Global Warming Potential* – Potencial de aquecimento global para horizonte de 100 anos) superiores a 30, conforme estabelecido pela norma ASHRAE34 para fluidos de baixo impacto ambiental. Adicionalmente, foram excluídos os fluidos que apresentam ODP (*Ozone Depletion Potential* – Potencial de degradação da camada de ozônio) maiores que zero. Ambos os parâmetros GWP100 e ODP são fornecidos pelo *CoolProp*;
- d) em relação aos aspectos de segurança e inflamabilidade, foram excluídos os fluidos com classificação 4 para os parâmetros HH (*Health Hazard* – Riscos à saúde) e FH (*Fire Hazard* – Riscos de inflamabilidade). Esses parâmetros são fornecidos pelo próprio *CoolProp*;
- e) para evitar necessidade de superaquecimento no processo de evaporação e permitir que a entalpia seja calculada pelo *CoolProp* em função da temperatura (uma vez que o título é conhecido na linha de vapor saturado), estruturou-se a planilha para trabalhar apenas com fluidos secos. Dessa forma, foram excluídos os fluidos classificados como úmidos ou isentrópicos. Para classificação dos fluidos em úmidos, secos ou isentrópicos, foram gerados e analisados, em função da inclinação do domo de saturação, os diagramas Temperatura-entropia para os fluidos que não haviam sido excluídos mediante aplicação dos critérios anteriores. Foram considerados secos os fluidos cuja inclinação da linha de tendência da região de vapor saturado fosse maior que zero, o que implica em uma inclinação do domo de saturação para a direita. A utilização de fluidos secos, juntamente com a adoção da temperatura da fonte quente como a temperatura de entropia máxima do fluido, além de evitar a necessidade de superaquecimento, contribui para que não haja condensação do fluido durante o processo de expansão isentrópica, uma vez que a linha vertical do ponto de entropia máxima não atravessa a região bifásica do diagrama $T-s$. O Apêndice B contempla os valores de temperaturas de entropia máxima dos fluidos classificados como secos.

Dessa forma, dos 122 fluidos existentes na biblioteca do *CoolProp*, foram selecionados 31 fluidos, para os quais podem ser calculados os respectivos ciclos nas condições de operação fornecidas pelo usuário da planilha. A lista completa dos fluidos selecionados pode ser encontrada no Apêndice A.

3.1.2 Condições de Operação

Adicionalmente, foram estabelecidas as seguintes condições operacionais para determinação das propriedades do sistema:

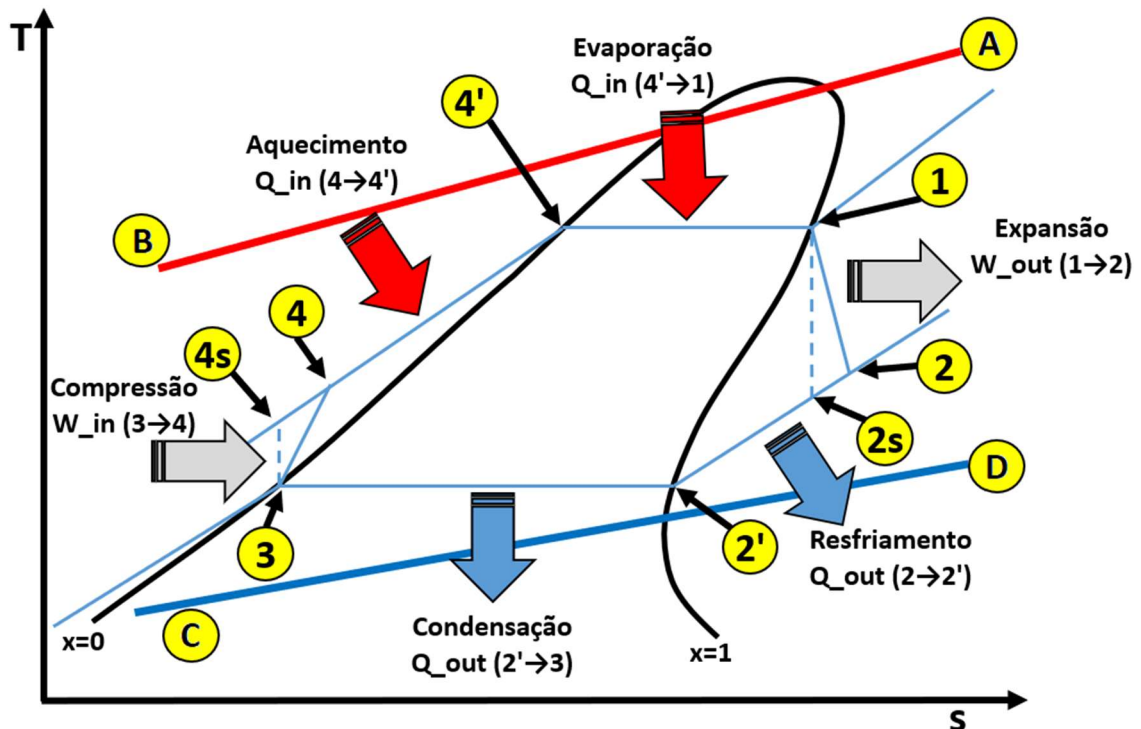
- a) faixa de trabalho da planilha situa-se entre 100 e 350 °C (abaixo de 100 °C a eletricidade produzida é excessivamente baixa, e em temperaturas acima de 350° já pode começar a ser viável a implantação de ciclos Rankine convencionais ou outros tipos de sistemas de recuperação de energia);
- b) processo de expansão ocorre em um único estágio, de modo a reduzir os custos de aquisição, operação e manutenção da turbina;
- c) foram desconsideradas perdas por energia cinética e energia potencial;
- d) foi desconsiderado o risco de cavitação na bomba, assumindo-se que o sistema oferecido pelo fabricante é dimensionado de modo a evitar condições desfavoráveis de funcionamento;
- e) todos os processos ocorrem em regime permanente, nas condições informadas;
- f) pressão atmosférica local assumida constante a 101,325 kPa;
- g) temperatura da fonte quente assumida constante e igual à temperatura de entropia máxima do fluido;
- h) temperaturas assumidas constantes para a fonte fria (água de resfriamento), iguais a 25 °C na entrada e 30 °C na saída;
- i) vazão da água de resfriamento ocorre de forma constante, a pressão atmosférica;
- j) pressão no condensador é 5 kPa superior à pressão atmosférica, de modo a evitar entrada de ar no sistema, tornando desnecessária aquisição de equipamentos desaeradores;
- k) fonte quente disponível na forma de gases de exaustão, com pressão e vazão informadas pelo usuário (assumidas constantes);
- l) vazão do fluido de trabalho ocorre de forma constante;
- m) *pinch point* mínimo no evaporador é de 10 °C, ou seja, admite-se que a máxima temperatura do fluido de trabalho é 10 °C inferior à temperatura dos gases quentes no início da evaporação do fluido (ponto 4’);
- n) *pinch point* mínimo no condensador é de 5 °C, ou seja, admite-se que a mínima temperatura do fluido de trabalho é 5 °C superior à temperatura da água de resfriamento no início da condensação do fluido (ponto 2’);
- o) eficiência do gerador elétrico é de 95%;

- p) eficiências da turbina e da bomba são de 70%;
- q) eficiências dos trocadores de calor (aquecedor/evaporador e resfriador/condensador) são de 90%, já incluídas as perdas de rendimento devido a incrustações;
- r) assumidas propriedades dos gases de exaustão iguais às propriedades do ar, de modo a permitir a determinação das propriedades termodinâmicas pelo *CoolProp*;
- s) gases de exaustão deixam o sistema a 105 °C, que é um valor a partir do qual existe pouco risco de condensação de vapores de enxofre e de água eventualmente presentes nos gases, o que poderia causar danos ao sistema de evaporação.

3.1.3 Metodologia para cálculo do ciclo

Para calcular o ciclo e construir as fórmulas na planilha, partiu-se das hipóteses e premissas apresentadas anteriormente, chegando-se ao diagrama Temperatura-entropia representado pela Figura 17, com os mesmos pontos do ciclo termodinâmico apresentado no tópico anterior. Também foi necessário adotar a divisão do processo de aquecimento em duas etapas, sendo a primeira entre os pontos 4 e 4' (aquecedor) e a segunda entre os pontos 4' e 1 (evaporador, com mudança de fase de líquido para vapor). Analogamente, o processo de resfriamento também foi dividido, entre os pontos 2 e 2' (resfriador) e entre os pontos 2' e 3 (condensador, com mudança de fase de vapor para líquido). Essa divisão permite que o *CoolProp* determine as propriedades (por exemplo, entalpia e entropia) a partir de um único parâmetro (por exemplo, temperatura ou pressão), uma vez que o título é conhecido nos pontos coincidentes com a curva de saturação (pontos 4', 1, 2' e 3).

Figura 17 – Diagrama $T-s$ com a identificação dos pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No Quadro 4, são representados os fluxos, fluidos e respectivos estados físicos em cada ponto do ORC mostrado na Figura 17.

Quadro 4 – Descrição dos fluxos, fluidos e estados físicos do ORC estudado.

(continua)

Ponto	Descrição do Fluxo	Fluido
1	Saída do evaporador/ Entrada da turbina	Fluido orgânico (vapor saturado)
2	Saída da turbina/ Entrada do resfriador	Fluido orgânico (vapor superaquecido)
2'	Saída do resfriador/ Entrada do condensador	Fluido orgânica (vapor saturado)
3	Saída do condensador/ Entrada da bomba	Fluido orgânico (líquido saturado)

Quadro 4 – Descrição dos fluxos, fluidos e estados físicos do ORC estudado.

(conclusão)

Ponto	Descrição do Fluxo	Fluido
4	Saída da bomba/ Entrada do aquecedor	Fluido orgânico (líquido comprimido)
4'	Saída do aquecedor/ Entrada do evaporador	Fluido orgânico (líquido saturado)
A	Entrada do evaporador	Gases quentes
A'	Saída do evaporador/ Entrada do aquecedor	Gases quentes
B	Saída do aquecedor	Gases quentes
C	Entrada do condensador	Água de resfriamento (líquido saturado)
C'	Saída do condensador/ Entrada do resfriador	Água de resfriamento (líquido saturado)
D	Saída do condensador	Água de resfriamento (líquido saturado)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Inicialmente, determinam-se as entalpias de entrada e saída dos gases de exaustão, temperaturas de evaporação e condensação do fluido. São determinadas também as entalpias do fluido orgânico nos demais pontos do ciclo.

Aplicando-se os balanços de energia de 1ª Lei da Termodinâmica para volumes de controle situados nos processos de aquecimento/evaporação, simplificados a partir das premissas adotadas anteriormente, foi possível obter as equações 3.1 a 3.3, sendo então possível determinar o calor fornecido ao sistema e a vazão mássica do fluido.

No Evaporador:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{gases} \cdot (h_A - h_B) \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_{gases} \cdot (h_A - h_B) = \dot{m}_f \cdot (h_1 - h_4) \quad (3.2)$$

Na Turbina:

$$h_2 = h_1 - \eta_{exp} \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (3.3)$$

De posse da vazão mássica do fluido, aplicando-se o balanço de energia de 1ª Lei entre os pontos 2 e 3 (equações 3.4 e 3.5), pode ser determinada a vazão mássica da água de resfriamento e o calor cedido pelo fluido.

No Condensador:

$$\dot{m}_{H2O} \cdot (h_D - h_C) = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_3) \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{H2O} \cdot (h_D - h_C) \quad (3.5)$$

Em seguida, foram determinadas a potência de eixo da turbina e a potência consumida pela bomba e a energia elétrica gerada, por meio das equações 3.6 a 3.11.

Na Bomba:

$$v_3 = \frac{1}{d_3} \quad (3.6)$$

$$W_P = v_3 \cdot (P_4 - P_3) \quad (3.7)$$

$$h_{4s} = h_3 + W_P \quad (3.8)$$

$$h_4 = h_3 + \frac{(h_{4s} - h_3)}{\eta_{comp}} \quad (3.9)$$

Na Turbina:

$$\dot{W}_{exp} = \dot{m}_f \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.10)$$

$$\dot{W}_{elctr} = \eta_{ger} \cdot \dot{W}_{exp} \quad (3.11)$$

Finalmente, pode ser então calculada a eficiência do ciclo, por meio da equação 3.12.

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{líquido}}{Q_{in}} = \frac{W_{exp} - W_P}{Q_{in}} \quad (3.12)$$

As equações 3.1 a 3.12 foram implementadas na planilha de cálculos, juntamente com as propriedades dos fluidos determinadas pelas funções do *CoolProp*. Os índices das propriedades referem-se aos pontos do ciclo que aparecem na Figura 17, mostrada anteriormente.

Os valores calculados acima serviram de base para o dimensionamento dos equipamentos e cálculo do investimento necessário, assuntos abordados na próxima seção.

Maiores detalhes sobre a sequência de elaboração dos cálculos e indicação do fluido indicado para as condições apresentadas, com os respectivos valores de potência produzida e eletricidade gerada, além de funções específicas relativas à interface com o usuário, podem ser encontrados no tópico 6, que tratou exclusivamente do produto técnico (planilha de cálculos).

3.2 Modelo Financeiro

Esta seção abordou os procedimentos adotados para estimativa dos custos envolvidos na implantação de um sistema ORC, mediante os valores calculados no modelo técnico. A seção 3.2.1 embasou a metodologia utilizada para levantamento de custos, enquanto a seção 3.2.2 indicou as premissas adotadas para se chegar às equações implementadas na planilha eletrônica.

3.2.1 Metodologia para estimativa dos custos de aquisição

Para se obter o valor total dos custos de aquisição, de forma dinâmica (mediante as condições de operação informadas pelo usuário), devem ser adotadas equações para estimativas dos custos de aquisição, operação e manutenção dos ORCs calculados no modelo técnico, uma vez que o levantamento dos valores mediante cotações e estudos elaborados é um processo lento e relativamente complexo, que foge ao propósito deste trabalho. Para esse tipo de estimativa, costumam ser utilizados métodos baseados na abordagem apresentada por Guthrie entre 1960 e 1970, conhecida como Técnica de Custeio de Módulos (MCT – *Module Costing Technique*), que relaciona todos os custos, diretos e indiretos, aos valores de aquisição, mediante aplicação de

condições e fatores de ajuste (TURTON *et al.*, 2018). No Quadro 5 estão os principais tipos de custos envolvidos em uma planta de processos químicos.

Quadro 5 – Principais custos associados a uma planta química.

Tipo de custo e classificação	Descrição
Custo dos equipamentos (direto)	Custo de aquisição dos equipamentos, descontando-se o frete
Materiais auxiliares para instalação (direto)	Tubulações, sistemas de combate a incêndio, fundações, suportes, estruturas, instrumentação, infraestrutura elétrica e acabamento superficial (pintura)
Mão de obra para instalação (direto)	Inclui os valores de mão de obra para instalação dos equipamentos e materiais auxiliares
Fretes, seguros e impostos (indireto)	Fretes e seguros até o local de instalação, acrescidos de eventuais impostos de aquisição e transporte
Taxas associadas à mão de obra (indireto)	Despesas trabalhistas para pessoal de instalação (férias, décimo terceiro, fundo de garantia, salários indiretos para supervisão do projeto, etc.)
Despesas de engenharia (indireto)	Salários e despesas trabalhistas para engenharia de desenvolvimento do projeto
Fatores de contingência (taxas)	Fundo de reserva para contornar eventuais imprevistos (acidentes, desastres naturais, flutuação do câmbio, etc.)
Preparação da planta (utilidades)	Aquisição e preparação do terreno, disponibilização de infraestrutura de água, eletricidade e esgoto, vias de acesso, entre outros (geralmente aplicável quando da construção de plantas novas)
Estruturas auxiliares (utilidades)	Construção de estruturas adicionais, tais como salas de engenharia, refeitórios, dormitórios, almoxarifado, tratamento de esgoto, carga e descarga de materiais, água de resfriamento e incineradores, entre outros.

Fonte: Adaptado de Turton *et al.*, 2018.

Na metodologia do MCT, os custos apresentados no Quadro 5 são calculados para cada equipamento (módulo) do ciclo, em função do principal atributo de cada um. Ou seja, de acordo com sua natureza e capacidade primária: turbinas e bombas são dimensionadas em função de sua potência (kW), trocadores de calor (evaporador e condensador) são dimensionados em função da área de troca térmica (m^2), tanques e reservatórios são dimensionados em função de seu volume (m^3) e assim por diante. No caso do ORC estudado no presente trabalho, uma vez que a configuração básica foi adotada, serão analisados somente bomba, turbina e trocadores de calor (condensador e evaporador).

As equações formuladas no MCT retornam, em última instância, os custos básicos associados a cada equipamento, expressos em dólares americanos (US\$), considerando equipamentos operando a pressões próximas à pressão ambiente e fabricados majoritariamente em aço carbono. Acréscimos de custos inerentes a operação em pressões mais elevadas ou a materiais construtivos mais resistentes são incorporados mediante coeficientes previamente tabelados e equações complementares.

A equação primária para estimativa dos custos para cada equipamento, nas condições básicas de operação descritas anteriormente, de acordo com Turton *et al.* (2018) é dada por:

$$\log_{10}C_P^0 = K_1 + K_2 \log_{10}(A) + K_3 [\log_{10}(A)]^2 \quad (3.13)$$

Onde:

C_P^0 : Custo do equipamento nas condições básicas;

K_1, K_2, K_3 : Parâmetros para cada equipamento (tabelados); e

A : Parâmetro associado à capacidade (atributo) de cada equipamento; o valor desse parâmetro deve ser substituído por A_{TT} (área de troca térmica), em m^2 , para o evaporador e para o condensador; para a bomba e a turbina, deve ser substituído por \dot{W} (potência). Os valores das potências da bomba e da turbina foram calculados pelas equações mostradas na seção 3.1; as áreas de troca térmica são calculadas em função dos calores Q_{in} e Q_{out} , recebido no evaporador e rejeitado no condensador, respectivamente. Foi assumida a premissa de que eventuais incrustações causadas pelos fluidos não venham a impactar a área de troca térmica necessária, considerando-se que a eficiência dos trocadores de calor já contemple tal fenômeno.

Para cálculo das áreas, foi implementada na planilha a expressão 3.14, que é a lei de resfriamento de Newton aplicada em trocadores de calor:

$$A_{TT} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad (3.14)$$

Onde:

A_{TT} : Área de troca térmica;

\dot{Q} : Taxa de transferência de calor (kW);

U : Coeficiente Global de transferência de calor; e

ΔT_{ml} : Média logarítmica da diferença de temperaturas.

De forma a calcular a média logarítmica da diferença de temperaturas, ΔT_{ml} , foi utilizada a expressão 3.15.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{f1,max} - T_{f2,max}) - (T_{f1,min} - T_{f2,min})}{\ln \frac{(T_{f1,max} - T_{f2,max})}{(T_{f1,min} - T_{f2,min})}} \quad (3.15)$$

Em que $f1$ e $f2$ são o fluido “quente” e “frio”, respectivamente, em cada trocador de calor. Dessa forma, é possível calcular o valor de MCT para os trocadores de calor (evaporador e condensador).

Adicionalmente, uma vez que o valor calculado se refere às condições básicas de operação, deve-se considerar o ajuste para condições próximas àquelas da operação do ORC proposto. Para esse ajuste, é necessário aplicar a equação 3.16.

$$C_{BM} = C_P^0 \cdot F_{BM} \quad (3.16)$$

Onde:

C_{BM} : Custo do equipamento nas condições de operação;

C_P^0 : Custo do equipamento nas condições básicas; e

F_{BM} : Fator de correção para as condições de operação (faixa de pressão e material construtivo), sendo calculado pela expressão 3.17.

$$F_{BM} = B_1 + B_2 \cdot F_P \cdot F_M \quad (3.17)$$

Onde:

B_1, B_2 : Parâmetros para cada equipamento (tabelados);

F_M : Fator associado ao material construtivo (tabelados); e

F_P : Fator associado à pressão de operação.

Para determinação do valor de F_P , utiliza-se, por sua vez, a expressão 3.18:

$$\log_{10}F_P = C_1 + C_2\log_{10}(P) + C_3[\log_{10}(P)]^2 \quad (3.18)$$

Em que:

C_1, C_2, C_3 : Parâmetros para cada equipamento (tabelados); e

P : Pressão de trabalho utilizada.

Os valores para os coeficientes tabelados, utilizados nas equações 3.13 a 3.18, podem ser encontrados no Apêndice C. Para escolha dos parâmetros, foram adotadas as seguintes premissas:

- a) Trocadores de calor de transferência direta (casco e tubo fixos, contracorrente), pela ampla versatilidade e capacidade de suportar elevadas pressões, além da simplicidade construtiva;
- b) Bomba centrífuga, pela maior simplicidade construtiva e manutenção mais simples (menor número de partes móveis);
- c) Turbina radial a gás, por ser a opção mais adequada ao ORC estudado (inexistência de fase líquida durante a expansão do fluido orgânico).

Adicionalmente, de modo a evitar corrosão dos equipamentos pela utilização de qualquer um dos fluidos selecionados, serão adotados equipamentos fabricados em aço inoxidável, obtendo-se um equilíbrio entre a durabilidade em relação ao aço carbono e custo mais acessível em relação a ligas de níquel e titânio.

Além da correção dos custos de cada equipamento em função das condições de pressão e material construtivo, deve-se atentar ao fato de que os valores calculados de C_{BM} se baseiam em coeficientes tabelados referentes ao ano de 2001, portanto devem ser corrigidos para a data atual. De acordo com Turton *et al.* (2018), existem diversos índices para corrigir os valores específicos de plantas químicas devido à inflação; dentre eles, destaca-se o CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*), cujo valor mais recente disponível (referente ao ano de 2020) foi

aplicado para atualização dos custos de aquisição. Portanto, o valor calculado deve ser corrigido pela expressão 3.19.

$$Custo\ corrigido = Custo\ calculado(2001) \cdot \frac{CEPCI(2020)}{CEPCI(2001)} \quad (3.19)$$

Para fins do presente trabalho, foram adotados os valores de CEPCI-2001 igual a 397 (TURTON *et al.* 2018) e CEPCI-2020 igual a 592 (CHEMICAL ENGINEERING, 2021).

Portanto, os custos brutos de aquisição obtidos pelo MCT (em dólares americanos) são calculados por meio da expressão 3.20:

$$C_{BM_total} = C_{BM_bomba} + C_{BM_turbina} + C_{BM_evap} + C_{BM_cond} \quad (3.20)$$

Uma vez que está sendo analisada a aplicação no mercado industrial brasileiro, deve ser realizada a conversão para a moeda brasileira (R\$), acrescentando-se as taxas e impostos relativos à importação dos equipamentos, já que o MCT foi originalmente delineado para o mercado industrial norte-americano, no qual não são considerados tais fatores. Assim, foram calculados também os valores relativos à taxa de importação, IOF e ICMS, a partir das equações 3.21 a 3.24.

$$C_{BM_total(R\$)} = C_{BM_total} \cdot Taxa\ de\ câmbio \quad (3.21)$$

$$C_{Importação} = C_{BM_total(R\$)} \cdot Taxa\ de\ importação \quad (3.22)$$

$$C_{IOF} = C_{BM_total(R\$)} \cdot Taxa\ IOF \quad (3.23)$$

$$C_{ICMS} = C_{BM_total(R\$)} \cdot Taxa\ ICMS \quad (3.24)$$

As taxas de câmbio, importação, IOF e ICMS utilizadas nas expressões 3.21 a 3.24 são fornecidas pelo usuário da planilha. À exceção da taxa de câmbio, de preenchimento obrigatório, os demais valores, caso deixados em branco, são assumidos como 14%, 6,38% e 18%, respectivamente (SISCOMEX, 2021).

Por fim, é possível calcular o valor final a ser investido, somando-se os custos de aquisição/instalação e os valores das demais taxas e impostos. O valor final é obtido pela equação 3.25.

$$C_{BM_final} = C_{BM_total(R\$)} + C_{Importação} + C_{IOF} + C_{ICMS} \quad (3.25)$$

3.2.2 Premissas e equações financeiras

Como premissa inicial, foi adotado que a análise de viabilidade financeira para recuperação do calor residual foi realizada exclusivamente por meio da implantação de ORC, excluindo-se quaisquer outros sistemas de potência, descaracterizando situações de investimento mutuamente excludentes. Por outro lado, foi assumido também que não existe dependência com outros tipos de investimento ou restrições orçamentárias, de modo que se pode caracterizar como independente o investimento no sistema ORC proposto.

Além disso, pelas características técnicas do ORC e pela incorporação física do sistema à planta industrial, descarta-se a possibilidade de venda ou substituição futura, o que permite assumir valor residual nulo após o final da vida útil, adotada em 20 anos, que é um valor usual em plantas dessa natureza, conforme já foi mencionado anteriormente.

Além dos custos de aquisição e instalação, são necessários gastos de operação e manutenção do sistema (O&M). Para cálculo desse valor, adotou-se 3% do valor de aquisição, que é um percentual normalmente aplicado em plantas industriais dessa natureza (QUOILIN *et al.*, 2011). Adicionalmente, para o objetivo proposto nesse trabalho, foi considerado que os custos associados à aquisição do fluido orgânico estão incluídos nos custos de O&M. A Equação 3.26 foi utilizada para cálculo do O&M, que representa as despesas anuais do ORC.

$$O\&M = C_{BM_total(R\$)} \cdot 0,03 \quad (3.26)$$

Uma vez que o produto técnico elaborado tem como principal público alvo empresas já consolidadas, não são consideradas expansões futuras significativas, de modo a permitir que os cálculos do ciclo sejam baseados no consumo atual de eletricidade, limitados a suprir a demanda sem que haja geração de excedente. Assim, foi estipulado um aumento total de 20% em relação ao consumo atual de energia elétrica, informado pelo usuário, de modo a contemplar

pequena expansão e absorver possíveis flutuações no padrão de consumo. Por meio das Equações 3.27 e 3.28 são calculados, respectivamente, os valores relativos ao consumo projetado de energia elétrica, considerado uniforme ao longo do tempo, e a quantidade total de energia produzida pelo ciclo.

$$CE_{Projetado} = CE_{Atual} \cdot 1,2 \quad (3.27)$$

$$EE_{produzida} = Regime\ de\ operação \cdot W_{Liq} \quad (3.28)$$

Em que:

$CE_{Projetado}$: Consumo projetado de energia elétrica;

CE_{Atual} : Consumo atual de energia elétrica;

$EE_{produzida}$: Quantidade de energia elétrica produzida pelo ORC;

$Regime\ de\ operação$: Quantidade de horas anuais de funcionamento do sistema; e

W_{Liq} : Potência líquida do ciclo.

De posse dos valores de $CE_{Projetado}$ e $EE_{produzida}$, pode-se calcular a diferença absoluta entre ambos, de modo a buscar o ciclo que melhor atenda o propósito do presente trabalho, ou seja, que traga a maior economia possível em relação ao consumo de energia elétrica, sem geração de excedente. A opção pela não geração de energia excedente visa minimizar os custos do investimento, uma vez que um menor volume de capital será comprometido no sistema, consequentemente permitindo maior flexibilidade aos gestores em relação à alocação de recursos em outros projetos. Além disso, o valor do kWh excedente é normalmente vendido à concessionária a um valor inferior ao de compra, o que torna pouco interessante a geração de energia elétrica além do consumo projetado. Salienta-se, também, que as empresas possivelmente interessadas na implantação de um ORC possuem como atividade fim a produção industrial (por exemplo, fábricas de cimento, cal ou siderúrgicas), portanto, a não geração de eletricidade excedente também busca manter o ramo principal de atividade da empresa.

Portanto, como principal critério para escolha do sistema, foi utilizada a Equação 3.29. A planilha eletrônica busca o resultado que possua o menor valor absoluto entre a eletricidade produzida e o consumo projetado.

$$DIF_{consumo} = |(EE_{produzida} - CE_{Projetado})| \quad (3.29)$$

Também foi calculado o valor da economia bruta obtida pela implantação do ciclo, equivalente à redução dos gastos com eletricidade adquirida da concessionária local. A Equação 3.30 permite calcular o valor, em base anual, da redução na fatura de energia elétrica da empresa.

$$Economia = EE_{produzida} \cdot \text{valor do kWh} \quad (3.30)$$

Em relação a possíveis reajustes no valor do kWh, foi adotada a premissa que todos os fluxos de caixa serão afetados igualmente pelos mesmos índices de inflação, de modo que podem ser desconsiderados cálculos adicionais de projeção do valor pago à concessionária por cada kWh consumido.

Adicionalmente, para melhor análise da viabilidade quanto à implantação de um sistema ORC na planta existente, bem como comparação deste projeto com outras opções de investimentos com diferentes tempos de vida, é necessário calcular o valor anualizado do investimento.

De modo a calcular os custos anuais do projeto, deve-se ter em mãos as parcelas do investimento pagas com capital de terceiros (alavancagem) ou com capital próprio. Sobre a primeira, incidirão as taxas de juros; sobre a segunda, incidirá o valor da Taxa Mínima de Atratividade, composta pela taxa de juros acrescida de uma porcentagem adicional, em função do prêmio associado ao risco estimado para o investimento. Tanto o valor do prêmio como a taxa de juros devem ser fornecidas pelo usuário da planilha. Com essas taxas, calcula-se o CMPC, por meio da equação 3.31.

$$CMPC = i \cdot A + j \cdot P \quad (3.31)$$

Onde:

i: Taxa anual de juros;

A: Parcela do investimento paga com capital de terceiros;

j: Taxa Mínima de Atratividade;

P: Parcela do investimento paga com capital próprio.

O CMPC é utilizado para calcular o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), utilizando-se a equação 3.32, assumindo que ao final da vida útil o valor residual contábil seja nulo.

$$CAUE = \frac{\text{Valor aquisição}}{(1 + CMPC)^t - 1} + O\&M \text{ anual} - \frac{\text{Valor residual}}{CMPC} \quad (3.32)$$

Onde:

CMPC: Custo Médio Ponderado de Capital;

t: Vida útil do sistema;

Valor aquisição: Calculado pela equação 3.2.13 (C_{BM_final}).

De posse dos custos anuais do sistema e da energia anual produzida, é possível calcular, por meio da Equação 3.33, o LCOE, que, conforme mencionado anteriormente, representa o custo unitário de cada kWh produzido pelo ORC:

$$LCOE = \frac{CAUE}{EE_{prod}} \quad (3.33)$$

Para ser possível calcular a economia anual gerada pelo ORC, deve-se ter em mente que, uma vez que a eletricidade gerada proporcionará redução dos custos com energia elétrica pagos à concessionária, poderá haver incidência de Imposto de Renda (IR) adicional sobre o lucro eventualmente obtido pelo aumento da receita. Portanto, deve-se incluir a parcela relativa ao IR no cálculo do Fluxo de Caixa Operacional (FCO), considerado uniforme ao longo do projeto, conforme a Equação 3.34. Na planilha de cálculo desenvolvida, o usuário tem a possibilidade de preencher o valor da alíquota do IR praticado (por padrão, a planilha adotará o valor de 34%, onde 25% são referentes à renda e 9% são referentes à contribuição social).

$$FCO = \{[(CE_{Proj} \cdot V_{kWh}) - (CE_{Proj} - EE_{prod}) \cdot V_{kWh} - O\&M] - D\} \cdot (1 - IR) + D \quad (3.34)$$

Onde:

FCO : Fluxo de Caixa Operacional;

CE_{proj} : Consumo projetado de eletricidade;

V_{kWh} : Valor do kWh;

EE_{prod} : Energia elétrica produzida pelo ORC;

O&M: Custos anuais de Operação e Manutenção;

IR : Alíquota do Imposto de Renda;

D : Depreciação anual.

A taxa anual de Depreciação foi estipulada como linear e igual a 5%, uma vez que foi assumido valor residual nulo após a vida útil adotada de 20 anos. Assim, o valor correspondente à Depreciação na Equação 3.34 é obtido por meio da expressão 3.35.

$$\text{Depreciação anual} = 0,05 \cdot C_{BM_final} \quad (3.35)$$

Para cálculo do VPL, utiliza-se a equação 3.36:

$$VPL = \sum_1^t \frac{FC_n}{(1 + CMPC)^n} - \text{Investimento Inicial} \quad (3.36)$$

Em que:

FC_n : Fluxo de Caixa livre correspondente ao período n , gerado a partir do ano 1;

$CMPC$: Custo Médio Ponderado de Capital;

t : Vida útil.

Por fim, calcula-se o *Payback* simples, utilizando-se a expressão 3.37.

$$PB_s = \frac{C_{BM_final}}{FCO} \quad (3.37)$$

Em que C_{BM_final} representa os custos totais de aquisição do sistema.

Vale ressaltar que, para a análise financeira do ORC proposto, parte-se da premissa que a energia elétrica passa a ser produzida na quantidade total, em função das condições operacionais disponíveis, logo no início de funcionamento do ciclo. Além disso, está se assumindo que os custos de Operação e Manutenção (O&M) passam a incidir somente após o primeiro ano de funcionamento do sistema. Dessa forma, o valor total do investimento desconsidera a necessidade de capital de giro adicional.

Conforme foi mencionado anteriormente, o ORC tem por objetivo a geração de eletricidade a partir da recuperação de calor. No caso do presente estudo, esse calor é obtido pela absorção de energia térmica presente em gases residuais, descartados na atmosfera após todos os processos produtivos da empresa, inclusive após eventuais sistemas de cogeração ou reaproveitamento de energia. Dessa forma, a geração de eletricidade por meio do ORC, em tais casos, visa tão somente minimizar os custos com energia elétrica, sem geração de excedente energético.

Buscando manter a atividade primária e o objetivo financeiro das empresas, que é a geração de riqueza, foi adotada a premissa de buscar o ciclo que mais se aproxima do consumo de eletricidade da empresa, no que diz respeito aos equipamentos diretamente relacionados aos processos produtivos (bombas, compressores, exaustores, motores, sistemas auxiliares, etc.). Assim, dentre todos os ciclos calculados na planilha, é escolhido aquele que gere a maior quantidade de eletricidade possível, sem que haja qualquer excedente. Salienta-se que a energia elétrica excedente normalmente é vendida à concessionária a um valor inferior ao de compra, fazendo com que seja pouco interessante comprometer recursos excessivos para gerar energia elétrica além do consumo projetado. Dessa forma, o investidor pode ter maior flexibilidade quando da escolha por projetos de investimentos em sua empresa.

4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS

Nesta seção, foram mostrados os resultados obtidos a partir da aplicação da planilha para dois casos fictícios, simulando a análise para implantação de um ORC para aproveitamento do calor residual em ambos os casos. Apresentaram-se os valores obtidos para potência gerada pelo ciclo, quantidade de energia elétrica produzida, montante e prazo de retorno do investimento necessário, mediante as condições e restrições expostas. Ao final da seção, foi feita análise de sensibilidade dos resultados em função das variáveis de entrada, ou seja, em função das informações fornecidas pelo usuário da planilha.

4.1 Cenário I – Baixo potencial energético

Neste tópico, foi demonstrada a aplicação da planilha proposta para uma empresa com baixo potencial energético, ou seja, com regime de trabalho modesto em relação ao calor residual disponível (baixas temperaturas e vazões), com exibição dos resultados em função das variáveis de entrada (dados operacionais e financeiros). Nesse cenário, podem ser enquadrados processos industriais que já possuam algum sistema de cogeração ou reaproveitamento de calor, ou processos térmicos pouco intensos, de modo que os gases de exaustão lançados à atmosfera possuam pouca energia na forma de calor.

4.1.1 *Premissas de simulação*

Como premissas de simulação, foram adotadas as condições de contorno utilizadas para construção da planilha de cálculos, listadas a seguir:

- a) ORC de configuração básica;
- b) ciclo subcrítico;
- c) critérios para seleção dos fluidos: apenas fluidos “secos”, monofásicos (puros), que não agridam a camada de ozônio, que não contribuam significativamente para o aquecimento global, que tenham baixa inflamabilidade e baixos riscos à saúde e de contaminação;
- d) processo de expansão ocorre em um único estágio;
- e) desconsideradas perdas por energia cinética e potencial;
- f) todos os processos do ciclo ocorrem em regime permanente;
- g) condições atmosféricas adotadas: pressão de 101,325 kPa, temperatura de 25 °C;

- h) pressão no condensador 5 kPa acima da pressão atmosférica;
- i) água de resfriamento entra no sistema a 25 °C e é descartada a 30 °C;
- j) eficiências da bomba e da turbina iguais a 70%;
- k) eficiências do evaporador e do condensador iguais a 90%;
- l) eficiência do gerador elétrico igual a 95%;
- m) faixa de cálculo da planilha: fonte quente entre 100 e 350 °C;
- n) propriedades dos gases de exaustão assumidas iguais às propriedades do ar;
- o) temperatura de saída dos gases de exaustão igual a 105 °C;
- p) temperatura de evaporação igual à temperatura de entropia máxima do fluido;
- q) *pinch point* mínimo no evaporador igual a 10 °C;
- r) *pinch point* mínimo no condensador igual a 5 °C;
- s) vida útil do sistema igual a 20 anos;
- t) custos de operação e manutenção (O&M) representam 3% dos custos de aquisição (sem considerar taxas e impostos de importação);
- u) valor residual ao final da vida útil igual a zero, com depreciação linear de 5% ao ano;
- v) produção de energia elétrica sem geração de excedente.

Como dados de entrada, preenchidos na interface do usuário, foram adotados os seguintes valores:

- a) horas trabalhadas por ano: 8.400 h (equivalentes a 350 dias trabalhados por ano);
- b) temperatura dos gases de exaustão: 110 °C;
- c) vazão volumétrica da fonte de calor: 36.000 m³/h;
- d) consumo de eletricidade: 50.000 kWh/mês (apenas equipamentos diretamente relacionados aos processos produtivos);
- e) valor do kWh: R\$ 1,67798 (CEMIG, 2021);
- f) cotação do dólar: R\$ 5,22 (cotação disponível em 19/07/2021);
- g) impostos de importação: 14%;
- h) ICMS: 18%;
- i) IOF: 6,38%;
- j) alíquota do IR: 34%;
- k) alavancagem: 0%;
- l) taxa de juros anual: 4,25% (taxa Selic em 19/07/2021);
- m) prêmio pelo risco assumido: 9%.

4.1.2 Resultados da simulação

A seguir, foram listados os resultados obtidos a partir do preenchimento dos dados de entrada, conforme Figura 18. Salienta-se que o critério utilizado pela planilha é buscar o ciclo que gere a maior quantidade de eletricidade possível, sem que haja excedente frente ao consumo futuro projetado, considerado 20% superior ao consumo atual, conforme mencionado anteriormente. Salienta-se, também, que o investimento máximo recomendado corresponde ao valor máximo a ser investido que permita VPL neutro ou positivo.

Resultados Estimados

Fluido recomendado: Ciclopentano

Eficiência do ciclo: 7,36%

Potência elétrica gerada: 13,71 kW

Energia elétrica produzida por mês: 9.596 kWh

Energia elétrica produzida por ano: 115.148 kWh

Redução no consumo de eletricidade: 15,99%

Demanda projetada da concessionária: 604.852 kWh/ano

Despesa projetada com a concessionária: R\$ 1.014.928,98/ano

Custo de capital: 13,25% ao ano

Investimento máximo recomendado: R\$ 849.034,00

Investimento total estimado: R\$ 2.980.265,00

Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE): R\$ 501.175,00/ano

Despesas anuais de Operação e Manutenção: R\$ 70.533,00

Custo Nivelado de Energia (LCOE): R\$ 4,352 R\$/kWh

Valor Presente Líquido: R\$ -2.131.231,00

Payback simples: N/A

Figura 18 – Resultados do Cenário I.

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para implantação de ORC básico			Projeto não recomendado (VPL negativo e/ou Investimento acima do valor recomendado)		
Dados de entrada			Resultados Estimados		
Regime de trabalho			Fluido recomendado	Ciclopentano	
Horas trabalhadas por ano (média)	8.400	Preenchimento OK!	Eficiência do ciclo	7,36	%
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	110	Preenchimento OK!	Potência elétrica gerada	13,71	kW
		Preenchimento OK!	Energia elétrica produzida por mês	9.596	kWh/mês
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	36.000	m ³ /h	Energia elétrica produzida por ano	115.148	kWh/ano
			Redução no consumo de eletricidade	15,99%	%
Consumo de energia			Demanda projetada da concessionária	604.852	kWh/ano
Consumo de eletricidade atual [kWh/mês]	50.000	Preenchimento OK!	Despesa projetada com a concessionária	1.014.928,98	R\$/ano
Valor do kWh [R\$] pago à concessionária	1,67798	Preenchimento OK!	Custo de capital	13,25	%/ano
Taxas e impostos			Investimento máximo recomendado	849.034	R\$
Cotação do dólar [R\$]	5,22	Preenchimento OK!	Investimento total	2.980.265	R\$
Impostos de importação [%]		Preenchimento opcional	Investimento total - capital próprio	2.980.265	R\$
ICMS [%]		Preenchimento opcional	Investimento total - capital de terceiros	0	R\$
IOF [%]		Preenchimento opcional	Pagamentos anuais para terceiros	0	R\$/ano
Alíquota Imposto de Renda [%]		Preenchimento opcional	Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	501.175	R\$/ano
Alavancagem [%]		Preenchimento opcional	Despesas anuais - Operação/ Manutenção	70.533	R\$/ano
Taxa de juros anual [%]	4,25%	Preenchimento OK!	Custo Nivelado de Energia (LCOE)	4,352	R\$/kWh
Prêmio pelo risco	9,00%	Preenchimento OK!	Valor Presente Líquido	-2.131.231	R\$
			Payback simples	N/A	anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.2 Cenário II – Elevado potencial energético

Neste tópico, foi demonstrada a aplicação da planilha proposta para uma empresa com elevado potencial energético, ou seja, com regime de trabalho intenso em relação ao calor residual disponível (elevadas temperaturas e vazões), com exibição dos resultados em função das variáveis de entrada (dados operacionais e financeiros). Nesse cenário, podem se enquadrar indústrias ainda sem sistemas de cogeração ou reaproveitamento de calor e/ou com processos térmicos intensos, gerando assim elevadas temperaturas e vazões associadas aos gases residuais lançados à atmosfera.

4.2.1 Premissas de simulação

Uma vez que a planilha foi concebida para analisar quaisquer situações operacionais de aproveitamento de calor residual na forma de gases quentes, as premissas adotadas são as mesmas em qualquer caso analisado. Dessa forma, foram aplicadas as mesmas condições de contorno apresentadas no Cenário I.

Como dados de entrada, foram adotados os seguintes valores:

- horas trabalhadas por ano: 8.640 h (equivalentes a 350 dias trabalhados por ano);
- temperatura dos gases de exaustão: 340 °C;
- vazão volumétrica da fonte de calor: 162.000 m³/h;
- consumo de eletricidade: 200.000 kWh/mês (apenas equipamentos diretamente relacionados aos processos produtivos);

- e) valor do kWh: R\$ 1,677980 (CEMIG, 2021);
- f) cotação do dólar: R\$ 5,22 (cotação disponível em 19/07/2021);
- g) impostos de importação: 14%;
- h) ICMS: 18%;
- i) IOF: 6,38%;
- j) alíquota do IR: 34%;
- k) alavancagem: 0%;
- l) taxa de juros anual: 4,25% (taxa Selic em 19/07/2021);
- m) prêmio pelo risco assumido: 6%.

4.2.2 Resultados da simulação

A seguir, foram listados os resultados obtidos a partir do preenchimento dos dados de entrada, conforme Figura 19. Salienta-se que foi mantido o critério utilizado pela planilha, ou seja, buscar o ciclo que gere a maior quantidade de eletricidade possível, sem que haja excedente frente ao consumo futuro projetado, novamente considerado 20% superior ao consumo atual.

Resultados Estimados

Fluido recomendado: Benzeno

Eficiência do ciclo: 5,00%

Potência elétrica gerada: 333,27 kW

Energia elétrica produzida por mês: 239.951 kWh

Energia elétrica produzida por ano: 2.879.415 kWh

Redução no consumo de eletricidade: 99,98%

Demanda projetada da concessionária: 585 kWh/ano

Despesa projetada com a concessionária: R\$ 982,00/ano

Investimento máximo recomendado: R\$ 30.586.892,00

Investimento total estimado: R\$ 17.402.706,00

Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE): R\$ 2.926.516,00/ano

Despesas anuais de Operação e Manutenção: R\$ 411.866,00

Custo Nivelado de Energia (LCOE): R\$ 1,016 R\$/kWh

Valor Presente Líquido: R\$ 13.184.186,00

Payback simples: 6,93 anos

Figura 19 – Resultados do Cenário II.

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para implantação de ORC básico			
Dados de entrada			
Regime de trabalho			
Horas trabalhadas por ano (média)	8.640	Preenchimento OK!	
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	340	Preenchimento OK!	
		Preenchimento OK!	
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	162.000		m ³ /h
Consumo de energia			
Consumo de eletricidade atual [kWh/mês]	200.000	Preenchimento OK!	
Valor do kWh [R\$] pago à concessionária	1,67798	Preenchimento OK!	
Taxas e impostos			
Cotação do dólar [R\$]	5,22	Preenchimento OK!	
Impostos de importação [%]		Preenchimento opcional	
ICMS [%]		Preenchimento opcional	
IOF [%]		Preenchimento opcional	
Alíquota Imposto de Renda [%]		Preenchimento opcional	
Alavancagem [%]		Preenchimento opcional	
Taxa de juros anual [%]	4,25%	Preenchimento OK!	
Prêmio pelo risco	9,00%	Preenchimento OK!	
Resultados Estimados			
Fluido recomendado	Benzeno		
Eficiência do ciclo	5,00		%
Potência elétrica gerada	333,27		kW
Energia elétrica produzida por mês	239.951		kWh/mês
Energia elétrica produzida por ano	2.879.415		kWh/ano
Redução no consumo de eletricidade	99,98%		%
Demanda projetada da concessionária	585		kWh/ano
Despesa projetada com a concessionária	982,15		R\$/ano
Custo de capital	13,25		%/ano
Investimento máximo recomendado	30.586.892		R\$
Investimento total	17.402.706		R\$
Investimento total - capital próprio	17.402.706		R\$
Investimento total - capital de terceiros	0		R\$
Pagamentos anuais para terceiros	0		R\$/ano
Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	2.926.516		R\$/ano
Despesas anuais - Operação/ Manutenção	411.866		R\$/ano
Custo Nivelado de Energia (LCOE)	1,016		R\$/kWh
Valor Presente Líquido	13.184.186		R\$
Payback simples	6,93		anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados obtidos nos Cenários I e II foram discutidos na próxima seção, juntamente com análise de sensibilidade das variáveis mais relevantes ao projeto.

4.3 Análise de sensibilidade e de cenários

Neste tópico, foram analisados os resultados obtidos a partir dos parâmetros de entrada informados nos casos I e II. Além disso, analisou-se de que maneira(s) a variação dos parâmetros operacionais de entrada (temperaturas, vazões, regime de trabalho, taxa de câmbio, valor do kWh, etc.) influenciou os resultados finais, tanto em questões técnicas (eficiência, potência gerada, quantidade de energia produzida), quanto financeiras (valor do investimento, custo anualizado e prazo para retorno, entre outros indicadores).

4.3.1 Resultados obtidos

Para fins de análise, os resultados obtidos nas simulações foram compilados na Tabela 5. Os resultados relativos aos valores de investimento por ano não foram incluídos, por serem proporcionais aos valores de investimentos totais nos respectivos casos.

Tabela 5 – Resultados da simulação de cenários.

Parâmetro	Unidade	Cenário I	Cenário II
Fluido recomendado	---	Ciclopentano	Benzeno
Eficiência do ciclo	%	7,36	5,00
Potência elétrica gerada	kW	13,71	333,27
Energia mensal produzida	kWh/mês	9.596	239.951
Energia anual produzida	kWh/ano	115.148	2.879.415
Redução no consumo de eletricidade	%	15,99	99,98
Demanda projetada da concessionária	kWh/ano	604.852	585
Despesa projetada com a concessionária	R\$/ano	1.014.929	982
Custo de capital	%/ano	13,25	13,25
Investimento máximo recomendado	R\$	849.034	30.575.565
Investimento total estimado	R\$	2.980.265	17.471.865
Custo Anual Uniforme Equivalente	R\$/ano	501.175	2.938.146
Operação e Manutenção	R\$/ano	70.533	413.503,00
Custo nivelado de energia	R\$/kWh	4,352	1,020
Valor Presente Líquido	R\$	-2.131.231	13.103.699
<i>Payback</i> simples	anos	N/A	6,97

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pela análise da Tabela 5 e das Figuras 18 e 19, constatou-se que, frente às condições financeiras estabelecidas (taxas, impostos, câmbio, etc.), um cenário operacional com disponibilidade de energia térmica excessivamente baixa (temperatura e vazão) tende a não apresentar condições favoráveis ao investimento em sistemas ORC. Nota-se Valor Presente Líquido negativo no Cenário I, com valor de investimento acima do valor recomendado, ou seja, nessas condições, provavelmente existirão no mercado melhores opções de investimento. Além disso, foi possível perceber que a energia elétrica produzida, sob tais condições, supre um valor percentual muito baixo do consumo projetado, com custo muito superior àquele pago à concessionária. O período para retorno do investimento não pôde ser calculado, corroborando o cenário desfavorável ao investimento.

Por outro lado, no Cenário II, em sendo mantidas as condições financeiras, com temperatura e vazão elevadas (o que torna disponível um valor superior de energia térmica residual), pode ser possível obter retorno satisfatório do investimento, uma vez que o Valor Presente Líquido se mostrou positivo. Adicionalmente, em tais condições, é possível suprir a

totalidade da energia elétrica consumida, a um custo inferior àquele pago para a concessionária, mesmo levando-se em conta a expansão projetada de 20% no consumo. Nesse caso, o projeto de investimento pode se mostrar viável, com *payback* esperado antes da metade da vida útil do sistema.

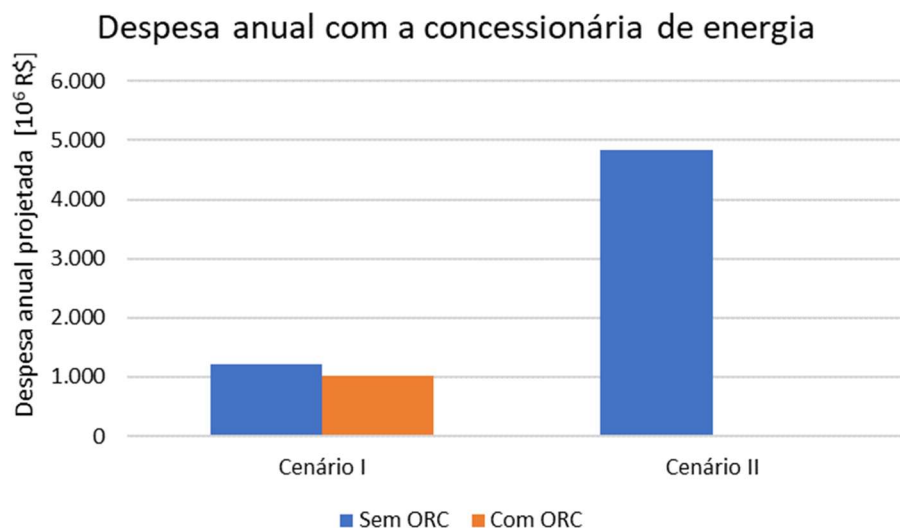
A Tabela 6 evidencia a redução na demanda energética projetada e na despesa anual com a concessionária de energia, para ambos os cenários propostos, isto é, o Cenário I com baixo calor residual disponível e o Cenário II com elevado calor residual disponível. O comportamento dessa redução pode ser observado graficamente na Figura 20.

Tabela 6 – Comparação da redução da demanda energética entre os Cenários I e II.

	Demanda projetada de eletricidade da concessionária [kWh/ano]		Despesa anual com a concessionária de energia [R\$/ano]	
	Sem ORC	Com ORC	Sem ORC	Com ORC
Cenário I	720.000	604.852	1.208.145	1.014.929
Cenário II	2.880.000	585	4.832.582	982

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 20 – Redução da despesa com eletricidade da concessionária entre os Cenários I e II.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Conforme pode ser concluído a partir da Tabela 6 e da Figura 20, condições de processo com grande quantidade de calor residual disponível (maiores temperaturas, vazões e regimes de trabalho) permitem maior geração de eletricidade, podendo atingir situações de

autossuficiência, ainda que sem geração de excedente, em relação à concessionária de energia elétrica. Além disso, deve ser salientado novamente que a maior geração de eletricidade tende a reduzir o custo do kWh produzido, que, conforme a Tabela 5, foi de R\$ 4,37 no Cenário I e de R\$ 1,02 no Cenário II.

4.3.2 *Análise de sensibilidade às variáveis de entrada*

De modo a fornecer uma visão mais abrangente do processo, ou seja, mapear qual o grau de influência das variáveis de entrada nos principais resultados do ciclo, foi realizada uma análise de sensibilidade às variáveis de entrada do sistema.

Para isso, foram elencados, como parâmetros de resultado, os valores de Eficiência, Potência, Produção anual de eletricidade, Percentual de economia frente ao consumo projetado, Montante total do investimento, Custo Nivelado de Energia (LCOE), Investimento máximo recomendado, Valor Presente Líquido (VPL), Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e *Payback*. Como variáveis de entrada, foram escolhidos: Regime de trabalho, Temperatura dos gases de exaustão, Vazão da fonte de calor, Valor do kWh, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco assumido e Taxa de juros. O Quadro 6 mostrou as variáveis de entrada escolhidas para cada um dos parâmetros de saída, em função da influência de cada variável no respectivo parâmetro.

Quadro 6 – Relações escolhidas entre os parâmetros de saída e as variáveis de entrada.

(continua)

Parâmetro de saída	Variáveis de entrada
Eficiência do ciclo	Temperatura, Vazão e Consumo de eletricidade
Potência elétrica gerada	Temperatura, Vazão e Consumo de eletricidade
Produção anual de eletricidade	Regime de operação, Temperatura, Vazão e Consumo de eletricidade
Redução percentual do consumo	Regime de operação, Temperatura, Vazão e Consumo de eletricidade
Investimento total	Temperatura, Vazão, Valor do kWh, Consumo de eletricidade e Cotação do dólar
Custo Nivelado de Energia	Regime de operação, Temperatura, Vazão, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco e Taxa de juros

Quadro 6 – Relações escolhidas entre os parâmetros de saída e as variáveis de entrada.

(conclusão)

Parâmetro de saída	Variáveis de entrada
Investimento recomendado	Regime de operação, Temperatura, Vazão, Valor do kWh, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco e Taxa de juros
Valor Presente Líquido	Regime de operação, Temperatura, Vazão, Valor do kWh, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco e Taxa de juros
Custo Anual Uniforme Equivalente	Temperatura, Vazão, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco e Taxa de juros
<i>Payback</i>	Regime de operação, Temperatura, Vazão, Valor do kWh, Consumo de eletricidade, Cotação do dólar, Alavancagem, Prêmio pelo risco e Taxa de juros

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em seguida, foram determinados valores padrão para as variáveis de entrada, assim como os diferentes valores assumidos por cada uma delas, conforme pode ser visto na Tabela 7. Os valores padrão foram escolhidos mediante porcentagens em relação aos limites inferior e superior (por exemplo, regime de trabalho, temperatura e alavancagem), ou ainda em função de variações gradativas ao redor de valores usuais ou estimados (vazão, cotação do dólar, valor do kWh e custo de capital). Para elaboração dos gráficos de correlação entre as variáveis de entrada e saída, foi variado apenas 1 parâmetro por vez, de modo a permitir identificar a influência individual de cada um nos resultados.

Tabela 7 – Variáveis de entrada e valores para análise de sensibilidade.

(continua)

Variável de entrada	Unidade	Valor padrão	Valores assumidos
Regime de trabalho	horas/ano	7.884	4.380; 4.818; 5.256; 5.694; 6.132; 6.570; 7.008; 7.446; 7.884; 8.322 e 8760
Temperatura dos gases de exaustão	°C	200	100; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 240; 260; 280; 300; 320 e 340
Vazão da fonte de calor	m ³ /h	108.000	20.000; 40.000; 60.000; 80.000; 100.000; 120.000; 140.000; 160.000; 180.000; 200.000; 220.000 e 240.000

Tabela 7 – Variáveis de entrada e valores para análise de sensibilidade.

(conclusão)

Variável de entrada	Unidade	Valor padrão	Valores assumidos
Valor do kWh	R\$	1,60	0,80; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80 e 2,00
Consumo de eletricidade	kWh/mês	250.000	30.000; 50.000; 80.000; 100.000; 125.000; 150.000; 175.000; 200.000; 225.000 e 250.000
Cotação do dólar	R\$	5,00	3,00; 3,50; 4,00; 4,50; 5,00; 5,50; 6,00; 6,50 e 7,00
Alavancagem	%	20	0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 e 100
Custo de capital	%	9,0	7; 8,5; 10; 11,5; 13; 14,5; 16; 17,5; 19; 20,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Como valores padrão adicionais, foram adotados, para todas as simulações:

- a) Impostos de importação: 14%;
- b) ICMS: 18%;
- c) IOF: 6,38%;
- d) Alíquota de Imposto de Renda: 34%.

A partir disso, foram simuladas na planilha as diferentes combinações listadas na Tabela 7, para os casos em que foi percebida influência das variáveis de entrada nos resultados; não foram incluídas as combinações em que não houve qualquer variação dos resultados em função de diferentes valores de entrada. Salienta-se que o critério em todos os casos foi buscar o ciclo que produzisse a maior quantidade de eletricidade possível, sem geração de excedente. Os resultados encontram-se nas Tabelas 8 a 16. A Tabela 8 apresentou os resultados em função da variação do Regime de Trabalho do sistema.

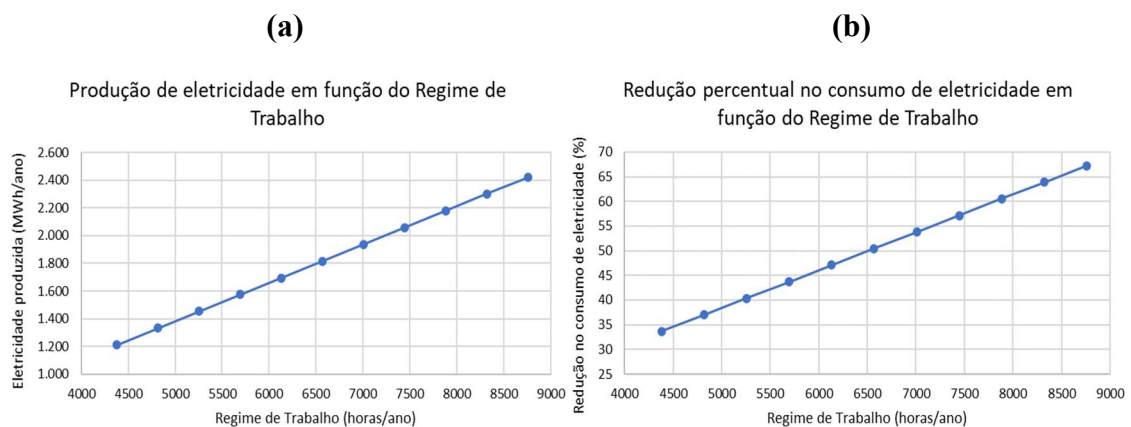
Tabela 8 – Variação dos resultados em função da variação do Regime de Trabalho.

Parâmetros de saída/ Resultados						
Variável: Regime de trabalho	Produção anual de eletricidade	Redução percentual do consumo	LCOE	Investimento total recomendado	VPL	Payback simples
Horas/ano	MWh/ano	%	R\$/kWh	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
4.380	1.211	33,6	2,219	10,8	-5,2	N/A
4.818	1.332	37,0	2,017	12,1	-3,8	N/A
5.256	1.453	40,4	1,849	13,5	-2,5	N/A
5.694	1.574	43,7	1,707	14,8	-1,2	N/A
6.132	1.695	47,1	1,585	16,2	0,2	20,09
6.570	1.816	50,5	1,479	17,5	1,5	15,63
7.008	1.937	53,8	1,387	18,9	2,9	13,11
7.446	2.058	57,2	1,305	20,2	4,2	11,44
7.884	2.180	60,5	1,233	21,6	5,6	10,21
8.322	2.301	63,9	1,168	22,9	6,9	9,26
8.760	2.422	67,3	1,109	24,2	8,2	8,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

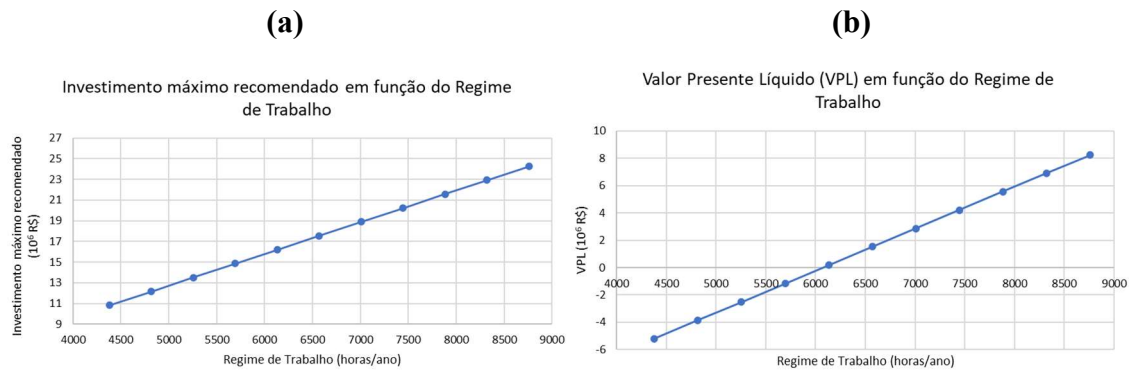
Para os resultados obtidos em função dos diferentes valores assumidos pela variável Regime de Trabalho, foram gerados gráficos de correlação, conforme pode ser visto nas Figuras 21 a 23.

Figura 21 – Influência do regime de trabalho na produção (a) e na redução percentual (b).



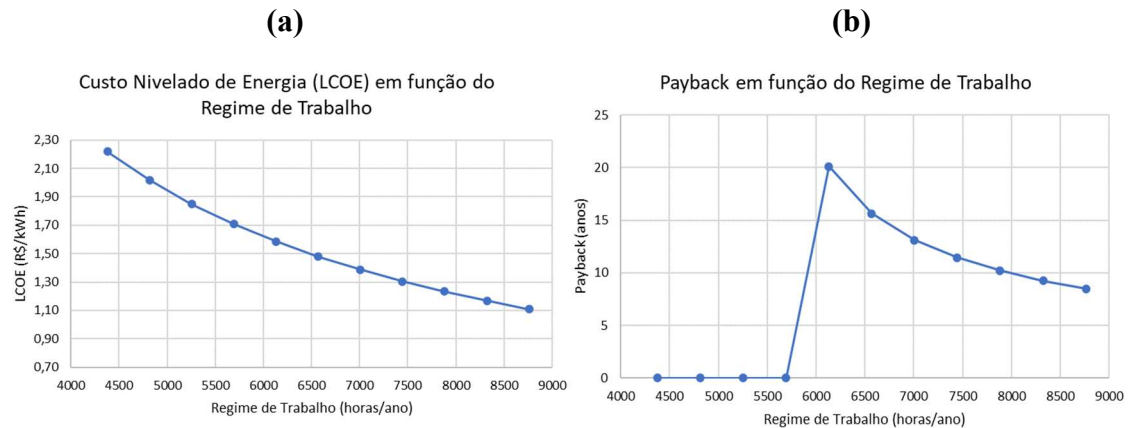
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 22 – Influência do regime de trabalho no investimento (a) e no VPL (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 23 – Influência do regime de trabalho no LCOE (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A análise dos gráficos de Regime de Trabalho permite constatar que existe correlação positiva direta desta variável de entrada com a produção de energia elétrica (Figura 21-a) e com a redução do consumo de eletricidade (Figura 21-b). Ou seja, mantidos os demais parâmetros, o aumento do regime de trabalho (maior número de horas em operação ao longo do ano) contribui positivamente para a viabilidade do investimento.

A Figura 22-a mostra que, quanto maior o regime de trabalho, maior será o valor recomendado para o investimento total, já que haverá maior receita disponível pela maior quantidade de eletricidade produzida; em sendo maior a receita, maior será a possibilidade de investir em sistemas de maior capacidade, caso seja viável frente aos demais parâmetros operacionais e financeiros. Vale ressaltar que o valor máximo recomendado é aquele a partir do qual o projeto de investimento já passa a ser menos interessante, já que passa a ser financeiramente inviável, já que passa a existir um Valor Presente Líquido negativo. Já a

principal conclusão obtida a partir da Figura 21-b é que o aumento do regime de trabalho tende a aumentar o VPL, tornando mais rentável o investimento.

Da mesma forma, de acordo com a Figura 23-a, regimes de trabalho mais intensos tendem a reduzir o custo nivelado de energia (LCOE), uma vez que ocorre diluição dos custos do investimento em uma maior quantidade de energia produzida. A Figura 23-b, por sua vez, indica que, mantidas as demais condições operacionais (vazão e temperatura, por exemplo), pode haver um valor mínimo de horas anuais trabalhadas para que o investimento seja viável, em função das demais variáveis de entrada, e a partir desse valor ocorre redução gradativa do tempo de *payback*. Nota-se, também, a partir da comparação das Figuras 22-b e 23-b, que esse valor mínimo é o mesmo para que o VPL se torne positivo e que o *payback* passe a ser efetivamente calculado.

Assim, pela análise das Figuras 21, 22 e 23, nota-se que o aumento do regime de trabalho traz impactos positivos ao projeto de investimento, sob diferentes aspectos. Além de um planejamento de produção adequado, também é de suma importância um planejamento de manutenção robusto, visando reduzir ao mínimo necessário o tempo fora de operação, para realização de manutenções programadas e, ao mesmo tempo, redução da probabilidade de paradas não programadas.

Analogamente, a Tabela 9 mostra os resultados obtidos quando foram variados os valores de temperatura da fonte de calor. A influência dessa variação nos parâmetros de saída pode ser vista nas Figuras 24 a 28.

Tabela 9 – Variação dos resultados em função da variação da Temperatura.

(continua)

Parâmetros de saída/ Resultados										
Temp.	Eficiência	Potência	Prod. Eletr.	Red. consumo	Inv. Estimado	LCOE	Inv. Recomend.	CAUE	VPL	<i>Payback</i> simples
°C	%	kW	MWh/ano	%	10 ⁶ R\$	R\$/kW h	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	Anos
100	7,1	20,4	161	4,5	3,8	3,99	1,2	0,6	-2,7	N/A
120	7,7	62,9	496	13,8	7,9	2,69	4,2	1,3	-3,7	N/A
140	8,2	107	844	23,4	10,4	2,07	7,7	1,7	-2,7	N/A
160	9,1	157,3	1240	34,4	12	1,62	11,8	2,0	-0,2	N/A
180	10	213,4	1682	46,7	14	1,40	16,4	2,4	2,4	13,4

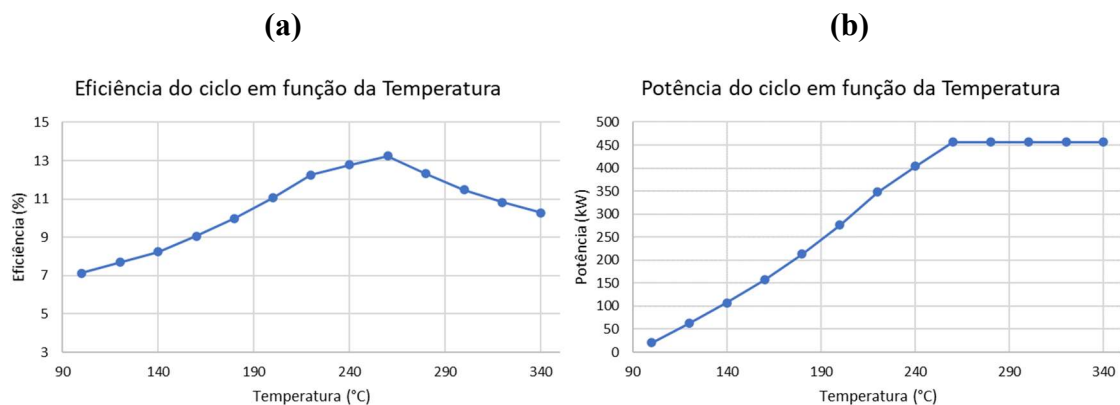
Tabela 9 – Variação dos resultados em função da variação da Temperatura.

(conclusão)

Parâmetros de saída/ Resultados										
Temp.	Eficiência	Potência	Prod. Eletr.	Red. consumo	Inv. Estimado	LCOE	Inv. Recomend.	CAUE	VPL	Payback simples
°C	%	kW	MWh/ano	%	10 ⁶ R\$	R\$/kW h	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	Anos
200	11	276,5	2180	60,5	16	1,23	21,6	2,7	5,6	10,2
220	12,3	348,3	2746	76,3	18,3	1,12	27,5	3,1	9,2	8,6
240	12,8	403,7	3182	88,4	18,3	0,96	32,3	3,1	14,1	6,9
260	13,2	456,6	3600	100	19,7	0,92	36,7	3,3	17,1	6,5
280	12,3	456,6	3600	100	18,2	0,85	37,0	3,1	18,8	5,9
300	11,5	456,6	3600	100	17,9	0,84	37,0	3,0	19,1	5,7
320	10,8	456,6	3600	100	17,9	0,83	37,0	3,0	19,2	5,7
340	10,3	456,7	3601	100	19,3	0,90	36,8	3,2	17,5	6,3

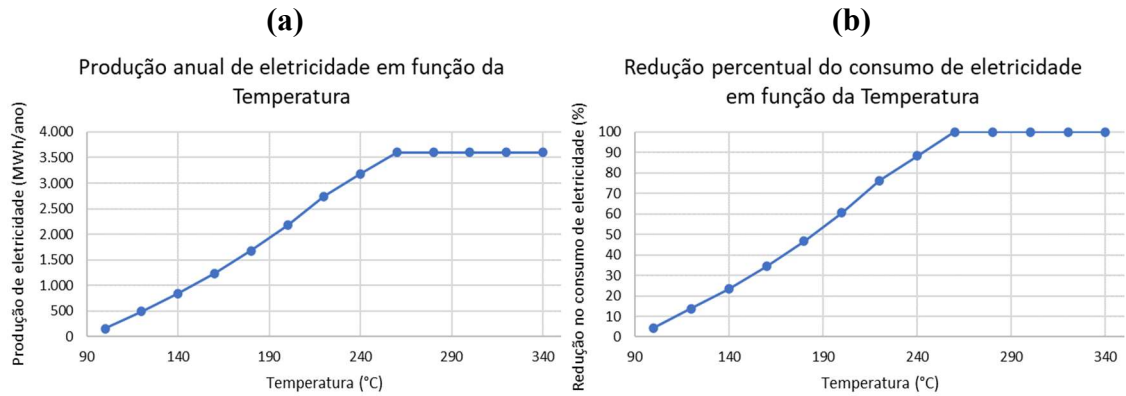
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 24 – Influência da temperatura na eficiência (a) e na potência do ciclo (b).



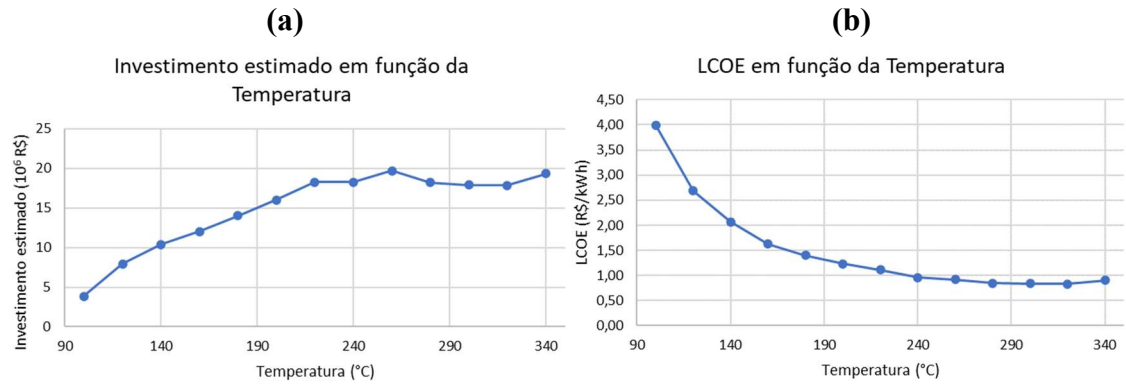
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 25 – Influência da temperatura na produção (a) e na redução percentual (b).



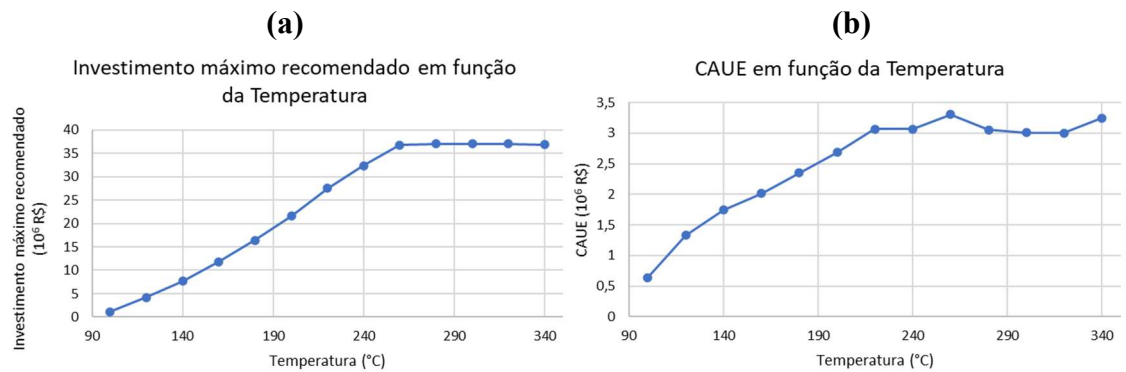
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 26 – Influência da temperatura no investimento (a) e no LCOE (b).



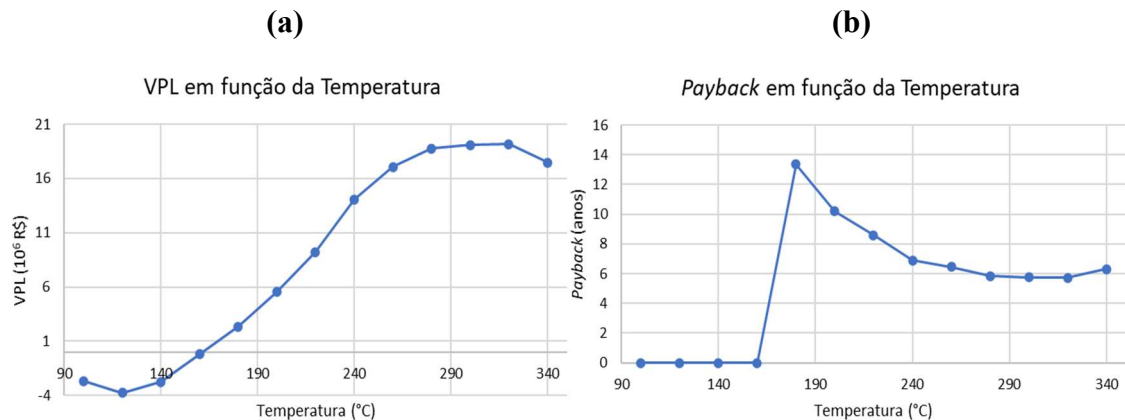
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 27 – Influência da temperatura no investimento máximo (a) e no CAUE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 28 – Influência da temperatura no VPL (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A análise dos gráficos de temperatura permite constatar que existe correlação positiva direta desta variável de entrada com a eficiência (Figura 24-a), que aumenta gradativamente até atingir um valor de pico, após o que passa a ocorrer redução. Em relação à potência do ciclo (Figura 24-b), a correlação também é positiva e direta, estabilizando-se a partir de determinada temperatura (por volta dos 260 °C). Tal estabilização ocorre pelo fato de que, conforme mencionado anteriormente, foi adotada como premissa a produção de energia elétrica até atingir o máximo de 100% do consumo projetado, ou seja, para não haver excedente. Assim, ao se atingir esse limite, sistemas com maior temperatura disponível passariam a operar com eficiência inferior à máxima possível, mediante a diferença de temperaturas entre a fonte quente e fria (o que vai ao encontro da Teoria de Carnot). Ao mesmo tempo, seriam especificados sistemas ORC de menores tamanhos, fazendo com que não houvesse aumento de potência em relação às maiores temperaturas da fonte quente.

As Figuras 25-a e 25-b apresentam o mesmo comportamento constatado em relação à Figura 24-b, ou seja, ocorre aumento da produção de energia e da redução percentual do consumo, até ser atingida a temperatura limite, a partir da qual a produção de energia se estabiliza, juntamente com a redução percentual do consumo. Salienta-se que a quantidade de energia produzida está atrelada à potência do ciclo, o que condiz com o comportamento dos gráficos mencionados anteriormente. Deve-se notar, também, que essa temperatura limite varia em função dos demais parâmetros operacionais (regime de trabalho, vazão, etc.), que, mantidos constantes para cada temperatura analisada, fazem com que todos os resultados em função da variação de temperatura apresentem o mesmo valor limite para estabilização da potência.

O valor estimado de investimento (Figura 26-a), ou seja, os custos de aquisição dos equipamentos, apresenta comportamento semelhante à curva da potência em função da

temperatura, uma vez que o sistema é dimensionado em função da potência do ciclo, que por sua vez é calculada, principalmente, em função da diferença de temperaturas entre a fonte quente e a fonte fria. Assim, de maneira semelhante, a partir de certo valor de temperatura, os custos de aquisição tendem a se estabilizar. Já o LCOE, conforme Figura 26-b, sofre redução gradativa com o aumento da temperatura, podendo chegar a um patamar de estabilização após o valor da temperatura a partir do qual a potência fica limitada à não geração de energia excedente.

Em relação à Figura 27-a, ou seja, ao valor máximo recomendado de investimento, o padrão segue o mesmo em relação à potência em função da temperatura e em função do regime de trabalho, ou seja, o valor máximo recomendado atinge seu pico na temperatura a partir da qual não haverá produção excedente de eletricidade, uma vez que a potência do ciclo, parâmetro essencial no dimensionamento dos equipamentos, também estará limitada pelo valor de temperatura a partir do qual a produção de energia ultrapassaria o consumo energético projetado. Da mesma forma, os Custos Anuais Uniformes Equivalentes (CAUE), na Figura 27-b, acompanham perfil semelhante, visto que esse parâmetro é calculado, principalmente, pelos custos de aquisição do sistema.

Na Figura 28-a, pode ser visto o comportamento do VPL, em que existe uma temperatura mínima para a qual o investimento passa a ser recomendável (o ponto em que a curva atravessa o eixo horizontal). O VPL aumenta gradativamente a partir dessa temperatura, estabilizando-se após ser atingido o valor a partir do qual passa a haver excedente de eletricidade produzida. Já o *Payback*, conforme a Figura 28-b, passa a existir a partir de uma temperatura mínima, ou seja, a tendência é que fontes de calor com temperaturas excessivamente baixas dificultem a viabilização do investimento. A partir dessa temperatura, o período de retorno do investimento sofre redução gradativa até estabilizar-se ao redor da temperatura onde deixa de haver excedente de eletricidade produzida, uma vez que a limitação da receita também limita os incrementos de fluxo de caixa.

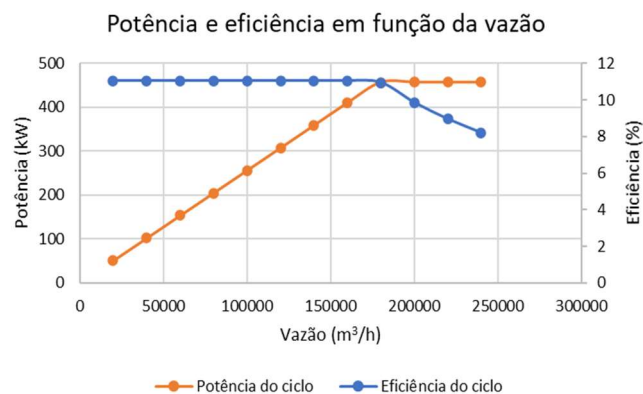
Em relação à Vazão dos gases de exaustão, os resultados nos parâmetros de saída encontram-se dispostos na Tabela 10, e podem ser vistos graficamente nas Figuras 29 a 33.

Tabela 10 – Variação dos resultados em função da variação da Vazão.

Parâmetros de saída/ Resultados										
Vazão	Eficiên cia	Potên cia	Prod. Eletr.	Red. Cons.	Inv. Estim.	LCOE	Inv. Recom.	CAUE	VPL	Payback simples
1000m ³ /h	%	kW	MWh/a no	%	10 ⁶ R\$	R\$/kW h	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
20	11	51	404	11,2	5,6	2,32	3,6	0,9	-2	N/A
40	11	102	807	22,4	8,8	1,82	7,5	1,5	-1,2	N/A
60	11	154	1211	33,6	11,3	1,57	11,6	1,9	0,3	19,2
80	11	205	1615	44,8	13,5	1,4	15,7	2,3	2,3	13,4
100	11	256	2018	56,1	15,3	1,27	19,9	2,6	4,6	10,9
120	11	307	2422	67,3	17	1,18	24,1	2,9	7,1	9,4
140	11	358	2825	78,5	18,5	1,1	28,3	3,1	9,8	8,4
160	11	410	3229	89,7	20	1,04	32,6	3,3	12,6	7,7
180	10,9	456	3598	100	21	0,98	36,5	3,5	15,5	7,1
200	9,9	457	3601	100	21,1	0,98	36,5	3,5	15,5	7,1
220	9	457	3601	100	22,9	1,06	36,2	3,8	13,4	8
240	8,2	457	3600	100	20	0,93	36,7	3,4	16,7	6,6

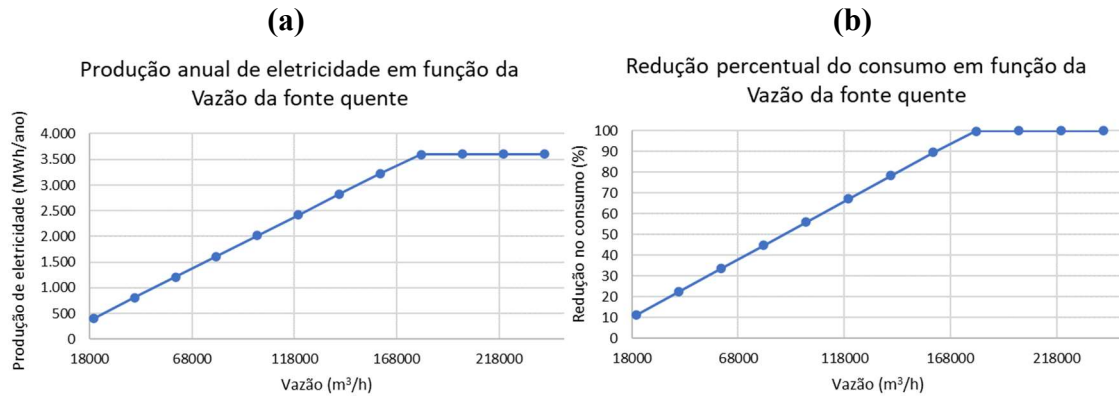
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 29 – Influência da vazão na eficiência e na potência do ciclo.



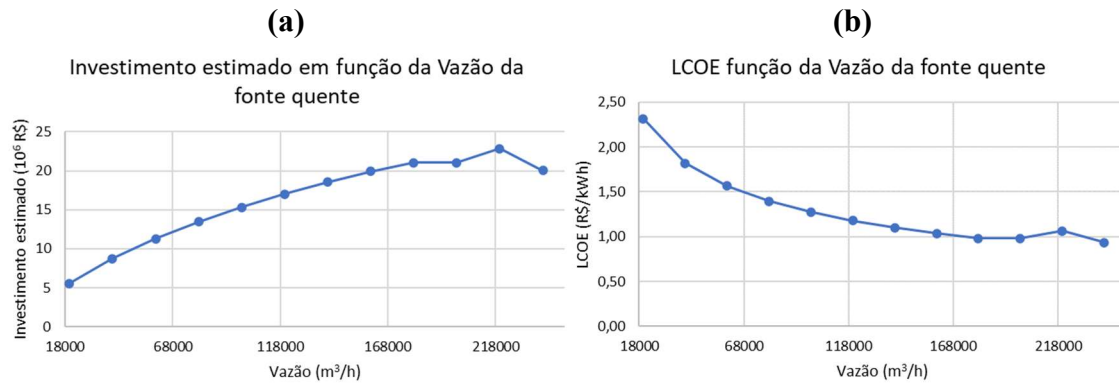
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 30 – Influência da vazão na produção (a) e na redução percentual (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 31 – Influência da vazão no investimento (a) e no LCOE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 32 – Influência da vazão no investimento máximo (a) e no CAUE (b).

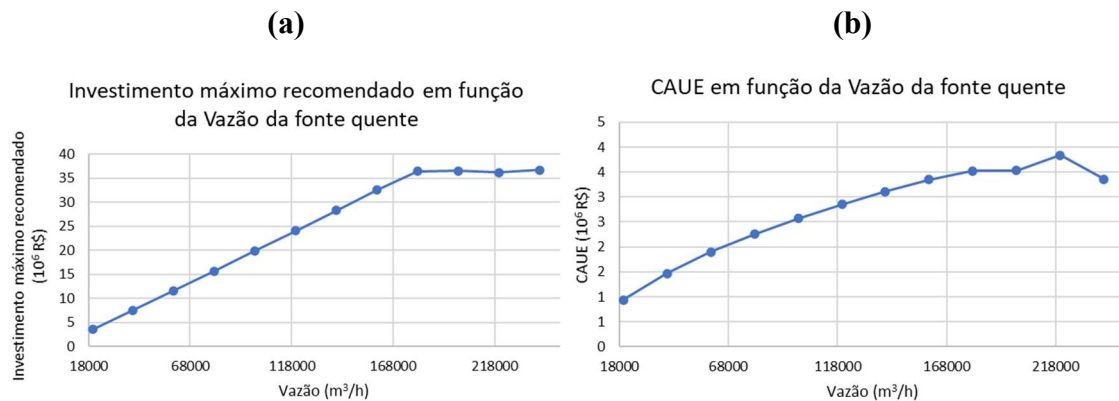
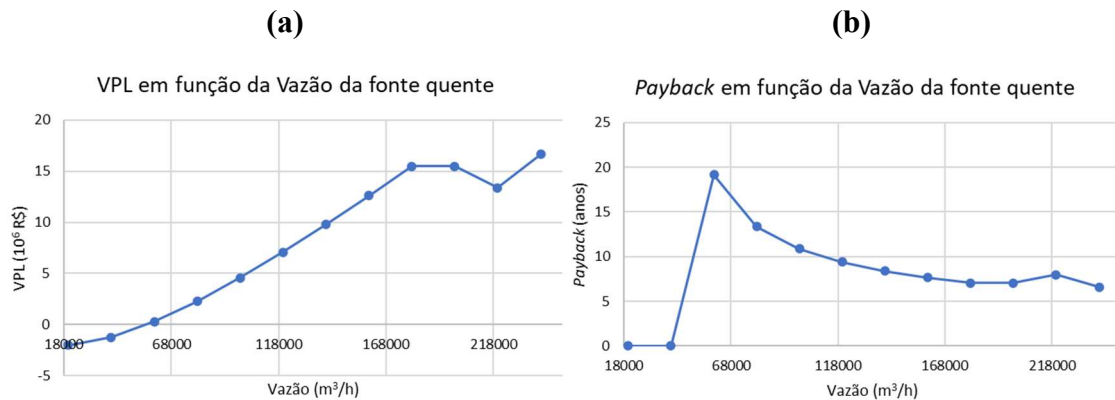


Figura 33 – Influência da vazão no VPL (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

É possível concluir, pela análise da Figura 29, que a vazão não influencia a eficiência do ciclo, a não ser nos casos em que passe a haver excedente de energia energética; no caso, esse valor equivale à vazão de 180.000 m³/h. Foram gerados gráficos à parte com diferentes valores de temperatura, em que o perfil de variação da vazão comprovou a não influência dessa variável de entrada na eficiência do ORC. Ainda na Figura 29, nota-se que a potência do ciclo aumenta linearmente, até atingir seu pico na vazão a partir da qual passa a haver excedente. Ou seja, conclui-se que a um mesmo valor crítico de vazão dos gases quentes correspondem os valores máximos de potência e eficiência do ciclo, de acordo com as condições estabelecidas.

Foi possível perceber, pela análise das Figuras 30 e 32-a, que existe comportamento semelhante ao que ocorre com a variação de temperatura: a produção de eletricidade, a redução percentual do consumo de energia elétrica da concessionária e o investimento máximo recomendado, respectivamente, aumentam diretamente com o aumento da vazão da fonte quente, até atingirem o pico. A esses valores máximos corresponde o mesmo valor de vazão destacado anteriormente, em relação à eficiência e potência. Novamente, salienta-se que adotou-se como premissa a não geração de excedente, conforme explicado em maiores detalhes no tópico 3.

Na Figura 31-a, em relação ao valor do investimento estimado em função da vazão da fonte quente, também se percebe correlação direta, estabilizando-se após a vazão limite para geração de excedente. Comportamento muito parecido se observa na Figura 32-b, sobre o CAUE. Tal semelhança condiz com o esperado, uma vez que os Custos Anualizados são calculados em função do valor de aquisição do sistema.

O gráfico do Valor Presente Líquido (Figura 33-a) mostra que, assim como ocorre com o regime de trabalho e a temperatura, existe um valor mínimo de vazão a partir do qual pode haver viabilidade financeira no investimento, conforme os demais parâmetros de entrada.

Também de maneira semelhante, percebe-se que a premissa pela não geração de excedente gera estabilização do VPL, a partir de determinada vazão. De maneira análoga, esse mesmo valor limite de vazão permite que seja possível encontrar o Payback, conforme pode ser observado na Figura 33-b.

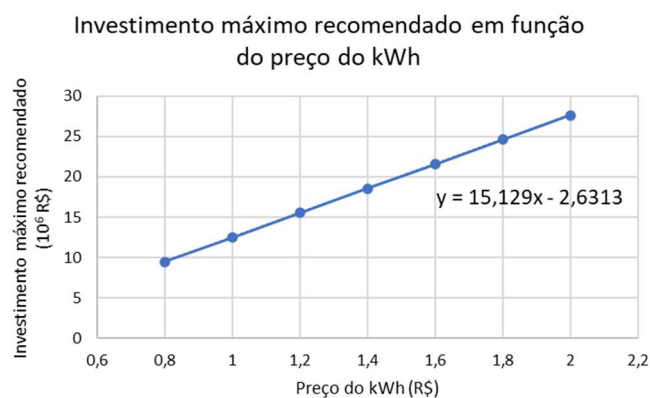
O preço pago em cada kWh consumido da concessionária de energia também influencia os resultados financeiros, conforme valores mostrados na Tabela 11 e nas Figuras 34 e 35.

Tabela 11 – Variação dos resultados em função da variação do preço do kWh.

Parâmetros de saída/ Resultados			
Preço do kWh	Investimento máximo recomendado	VPL	Payback simples
R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
0,8	9,5	-6,5	N/A
1	12,5	-3,5	N/A
1,2	15,5	-0,5	N/A
1,4	18,5	2,5	13,7
1,6	21,6	5,6	10,2
1,8	24,6	8,6	8,3
2	27,6	11,6	7,1

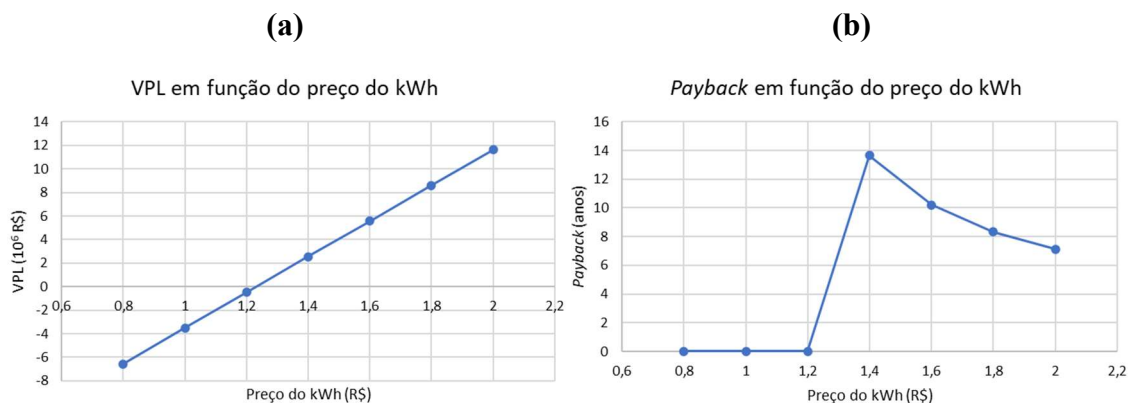
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 34 – Influência do preço do kWh no investimento máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 35 – Influência do preço do kWh no VPL (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando a Figura 34-a, é possível concluir que existe correlação direta entre o preço do kWh comprado da concessionária com o valor máximo recomendado para o investimento. Ou seja, quanto mais barato for a energia fornecida pela concessionária, menos interessante é investir na geração de energia própria, ainda que advinda do aproveitamento de calor descartado à atmosfera. O coeficiente de inclinação da linha de tendência, fornecido pela equação da regressão linear (15,129) indica forte correlação positiva, indicando que um pequeno incremento do preço do kWh pago à concessionária aumenta sensivelmente o valor máximo recomendado para o sistema ORC.

As Figuras 35-a e 35-b, por sua vez, complementam este raciocínio, mostrando que, além da correlação direta apresentada, também pode existir um preço mínimo do kWh que torne interessante o investimento em um sistema ORC, a partir do qual passa a haver VPL positivo e seja possível calcular o respectivo *payback*. Na análise de sensibilidade, conforme informado anteriormente, foi adotado valor de R\$ 1,60 como preço do kWh adquirido da concessionária. Nota-se, na Figura 35-a, que o valor de R\$ 1,20 é aquele em que o VPL deixa de ser negativo e passa a fornecer retorno financeiro.

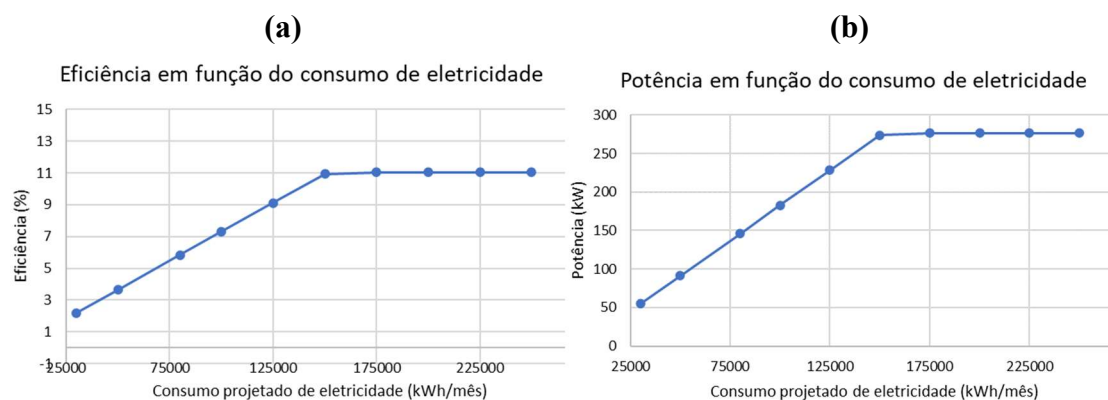
A Tabela 12 mostra os valores obtidos em função da variação do consumo projetado de eletricidade, ao passo que as Figuras 36 a 40 demonstram graficamente as correlações entre o consumo e os resultados do ciclo.

Tabela 12 – Variação dos resultados em função do consumo projetado.

Parâmetros de saída/ Resultados										
Consumo	Eficiência	Potência	Prod. Eletr.	Red. consumo	Inv. Estimado	LCOE	Inv. Recomend.	VPL	CAUE	Payback simples
MWh/mês	%	kW	MWh/ano	%	10 ⁶ R\$	R\$/kWh	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
30	2,2	55	432	100	7,7	2,99	3,5	-4,2	1,3	N/A
50	3,6	91	720	100	10	2,32	6,4	-3,6	1,7	N/A
80	5,8	146	1152	100	13,3	1,93	10,6	-2,7	2,2	N/A
100	7,3	183	1440	100	13,2	1,54	13,8	0,6	2,2	17,8
125	9,1	228	1800	100	15,9	1,48	17,4	1,5	2,7	15,8
150	10,9	274	2159	100	15,8	1,23	21,4	5,5	2,7	10,2
175	11	276	2180	86,5	16	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2
200	11	276	2180	75,7	16	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2
225	11	276	2180	67,3	16	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2
250	11	276	2180	60,5	16	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2

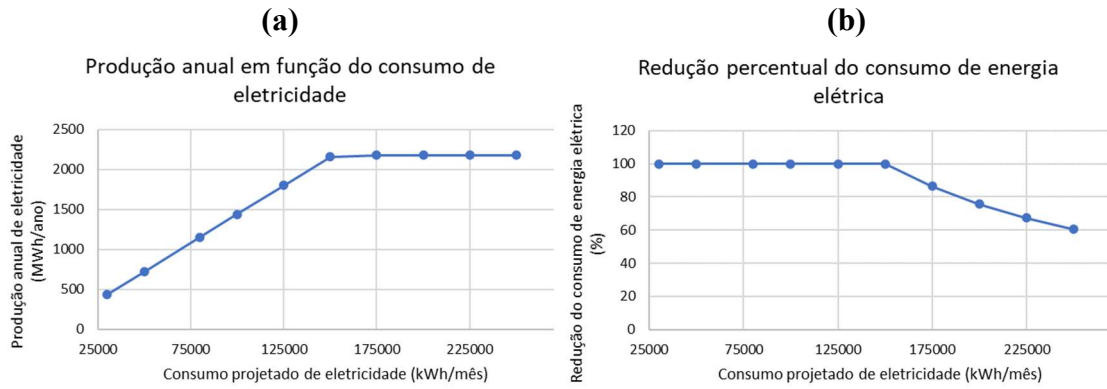
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 36 – Influência do consumo projetado na eficiência (a) e na potência (b).



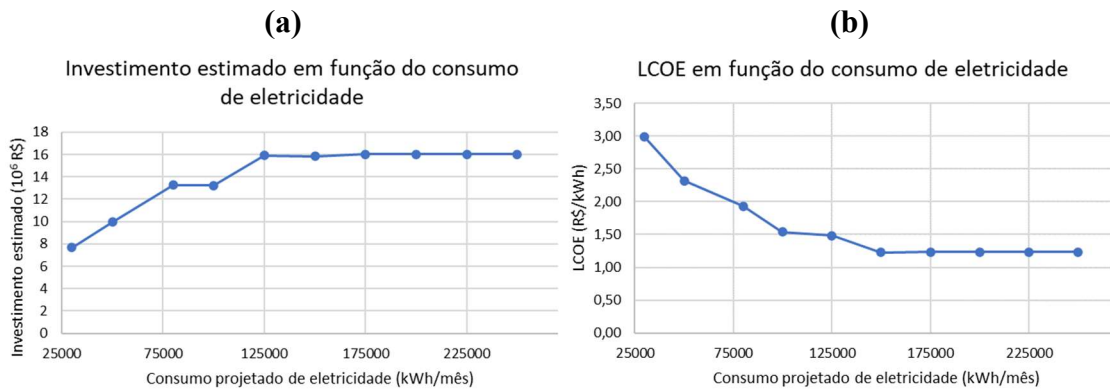
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 37 – Influência do consumo projetado na produção (a) e na redução percentual (b).



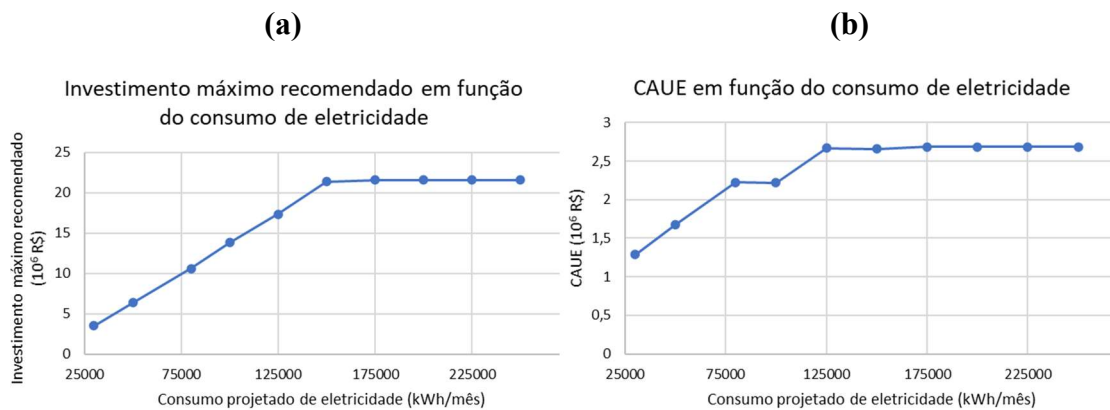
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 38 – Influência do consumo projetado no investimento (a) e no LCOE (b).



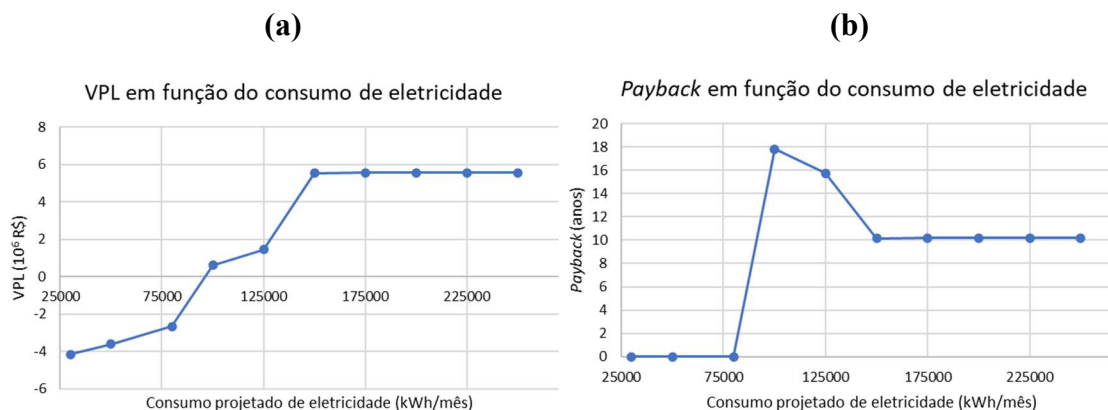
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 39 – Influência do consumo projetado no investimento máximo (a) e no CAUE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 40 – Influência do consumo projetado no VPL (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Da mesma forma que foi percebido em algumas das variáveis anteriores, pode ser percebido correlação direta positiva entre o consumo de eletricidade e alguns dos parâmetros de saída, tais como eficiência (Figura 36-a), potência do ciclo (Figura 36-b), produção anual de eletricidade (Figura 37-a), investimento estimado (Figura 38-a), investimento máximo recomendado (Figura 39-a) e CAUE (Figura 39-b). Além disso, também pode ser percebido um valor no eixo horizontal, ou seja, no consumo projetado de eletricidade, a partir do qual os resultados atingem um patamar de estabilização. Novamente, pode ser percebida a influência da premissa da não geração de excedente, justificada anteriormente.

Em relação à redução percentual do consumo, mostrada na Figura 37-b, conclui-se que, mediante os parâmetros operacionais padrão adotados, são dimensionados sistemas ORC capazes de suprir a totalidade do consumo projetado, até o momento em que passa a haver excedente energético, momento em que a redução passa a representar economia cada vez menor, em base percentual.

As Figuras 40-a e 40-b mostram, analogamente, o valor de consumo projetado a partir do qual pode ser interessante investir em um sistema ORC. Cenários industriais que apresentem consumo excessivamente baixo dificilmente justificariam assumir os riscos financeiros inerentes a projetos dessa magnitude; por outro lado, consumo energético excessivamente elevado dificilmente seria viável, a não ser que a empresa opte por diversificar o ramo de atuação, passando a vender o excedente produzido com sistemas de grande porte, o que foge ao escopo do presente trabalho.

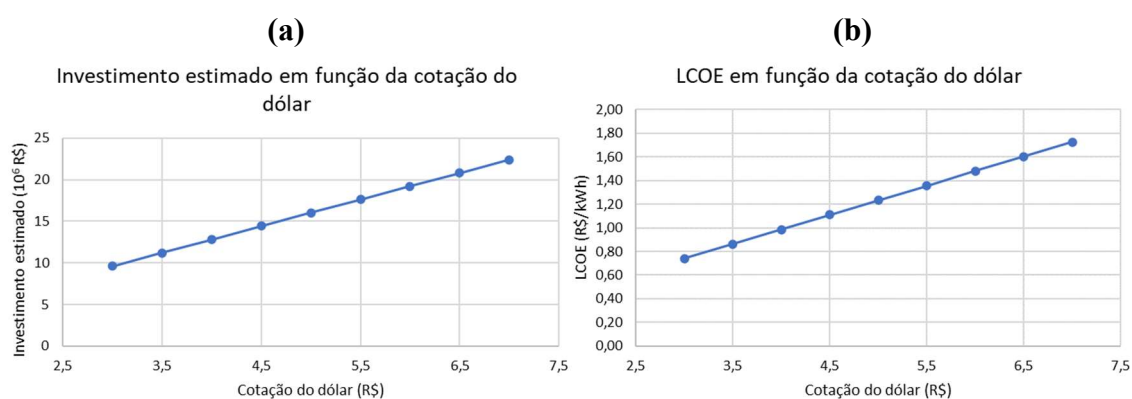
A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos em função da cotação do dólar no desempenho financeiro do ciclo, exibidos graficamente pelas Figuras 41 a 43.

Tabela 13 – Variação dos resultados em função da variação da cotação do dólar.

Parâmetros de saída/ Resultados						
Cotação do dólar	Investimento Estimado	LCOE	Investimento Recomendado	VPL	CAUE	Payback simples
R\$	10 ⁶ R\$	R\$/kWh	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
3,00	9,6	0,74	22,6	13,0	1,6	5,0
3,50	11,2	0,86	22,4	11,2	1,9	6,0
4,00	12,8	0,99	22,1	9,3	2,1	7,1
4,50	14,4	1,11	21,8	7,4	2,4	8,5
5,00	16,0	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2
5,50	17,6	1,36	21,3	3,7	3,0	12,4
6,00	19,2	1,48	21,0	1,8	3,2	15,6
6,50	20,8	1,60	20,8	0,0	3,5	N/A
7,00	22,4	1,73	20,5	-1,9	3,8	N/A

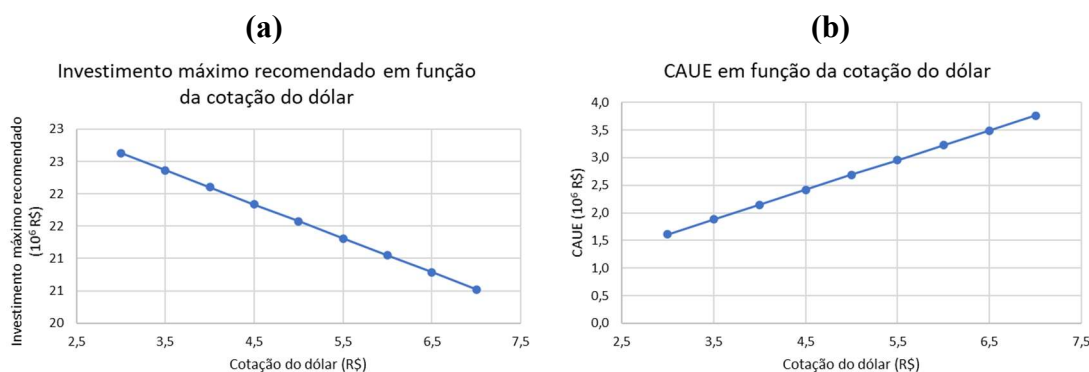
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 41 – Influência da cotação do dólar no investimento (a) e no LCOE (b).



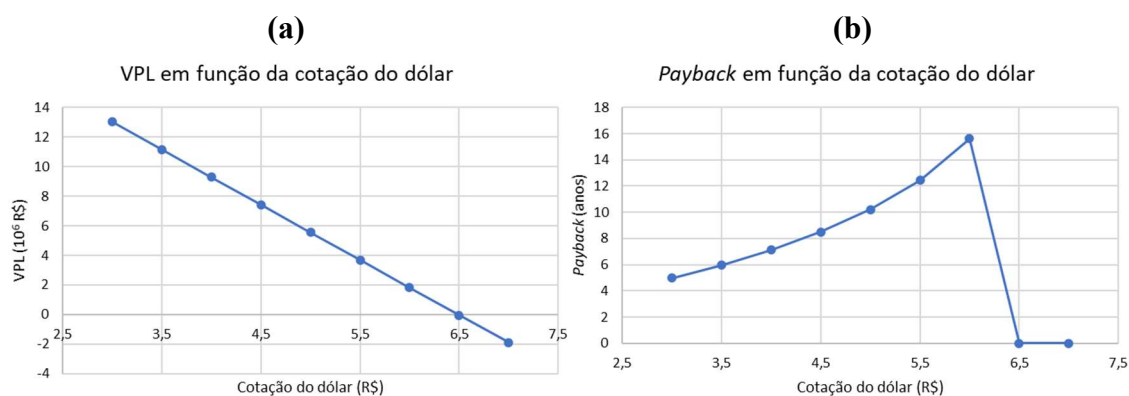
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 42 – Influência da cotação do dólar no investimento máximo (a) e no CAUE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 43 – Influência da cotação do dólar no VPL (a) e no *payback* (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Conforme foi mencionado anteriormente, o Brasil possui grande dependência tecnológica no que diz respeito a sistemas ORC, visto que não existem, na atualidade, empresas que forneçam soluções completas, tais como a Ormat ou a Turboden. Uma vez que existe, portanto, a necessidade de aquisição de maquinário importado, pode haver grande influência da taxa de câmbio nos indicadores financeiros do projeto, conforme pode ser visto nas Figuras 41, 42 e 43.

Nota-se que o aumento da cotação do dólar acarreta aumento do valor estimado do investimento (Figura 41-a), conseqüentemente também no Custo Nivelado de Energia (Figura 41-b) e no CAUE (Figura 42-b). Isso indica que taxas de câmbio mais elevadas desfavorecem a importação de bens manufaturados, prejudicando a viabilidade do projeto.

Esse cenário desfavorável, com o aumento da taxa de câmbio, também pode ser observado na Figura 42-a, que mostra cada vez menores os valores máximos recomendados para investimento, para a mesma geração de potência. Ao mesmo tempo, ocorre redução do VPL,

podendo inviabilizar por completo o investimento a partir de determinada cotação do dólar, a partir da qual o VPL pode passar a ser negativo. Paralelamente, a Figura 42-b mostra aumento do *payback* com o aumento do câmbio, até o ponto em que não é mais possível obter retorno do investimento.

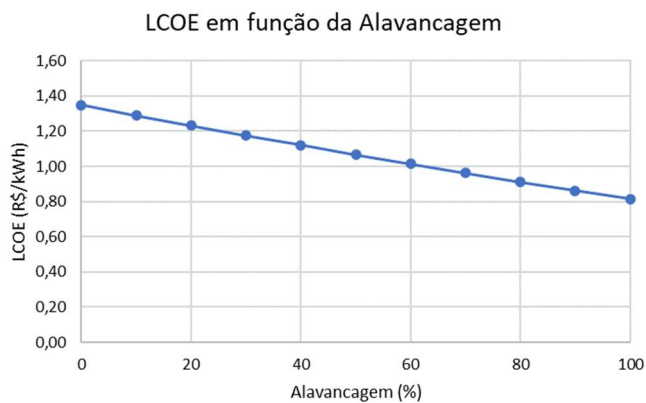
A Tabela 14 exhibe os resultados da variação do percentual de Alavancagem financeira (parcela investimento paga com capital de terceiros). Para melhor visualização dos resultados, foram elaborados gráficos de correlação entre as variáveis, conforme pode ser visto nas Figuras 44 a 46.

Tabela 14 – Variação dos resultados em função da alavancagem financeira.

Parâmetros de saída/ Resultados					
Alavancagem	LCOE	Investimento Recomendado	VPL	CAUE	<i>Payback</i> simples
%	R\$/kWh	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
0	1,35	19,5	3,4	2,9	11,6
10	1,29	20,5	4,5	2,8	10,8
20	1,23	21,6	5,6	2,7	10,2
30	1,18	22,8	6,8	2,6	9,7
40	1,12	24,1	8,1	2,4	9,2
50	1,07	25,6	9,6	2,3	8,8
60	1,01	27,2	11,2	2,2	8,5
70	0,96	29,0	13,0	2,1	8,1
80	0,91	31,0	15,0	2,0	7,9
90	0,86	33,2	17,2	1,9	7,6
100	0,81	35,7	19,6	1,8	7,4

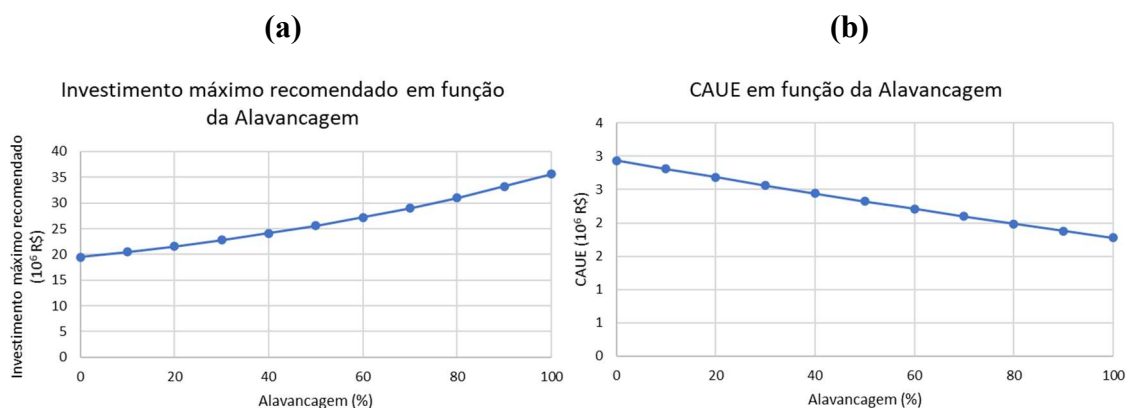
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 44 – Influência da alavancagem financeira no LCOE.

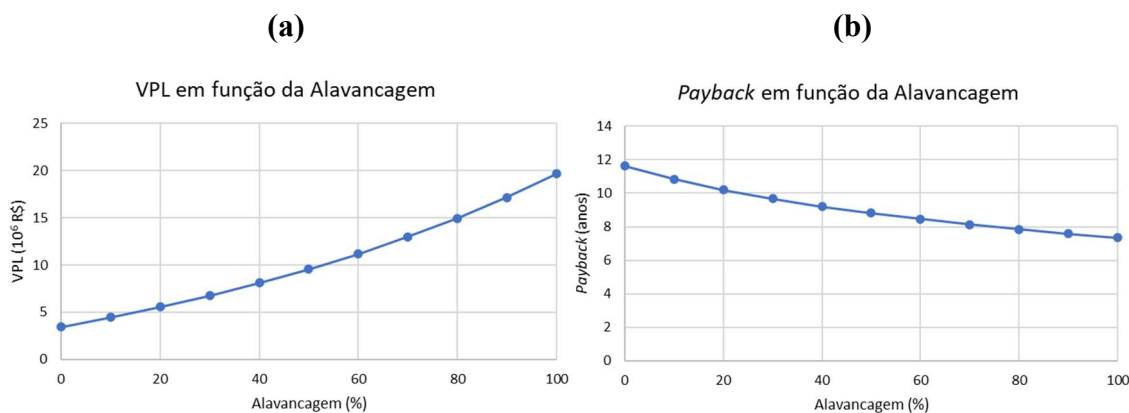


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 45 – Influência da alavancagem financeira no investimento máximo (a) e no CAUE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 46 – Influência da alavancagem financeira no VPL (a) e no *payback* (b).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pela análise das Figuras 45-a e 46-a, nota-se, respectivamente, aumento do investimento máximo recomendado e do VPL, em função de maiores percentuais de alavancagem. As Figuras 44, 45-b e 46-b mostram, respectivamente, redução do LCOE, CAUE e *Payback*, conforme aumenta a parcela do investimento paga com capital de terceiros.

Conforme descrito no tópico 3.2 (Modelo Financeiro), o CMPC é calculado em função da taxa de juros, que incide sobre o capital de terceiros (alavancado) e a Taxa Mínima de Atratividade, que incide sobre a parcela do investimento paga com capital próprio. A TMA, por envolver o prêmio pelo risco assumido, tende a ser maior que a taxa de juros, de modo que, quanto maior a parcela paga com capital de terceiros, menor será o CMPC, conseqüentemente tornando mais atrativo o investimento, conforme demonstrado pelas Figuras 44 a 46. Salienta-se, entretanto, que podem haver aspectos negativos em relação à alavancagem excessiva, especialmente no que diz respeito a eventuais multas e encargos contratuais por inadimplência. Além disso, os cenários socioeconômicos costumam ser bastante dinâmicos, aumentando a incerteza quanto às taxas de juros futuros, o que pode influenciar as relações demonstradas entre os indicadores anteriores.

Ainda em relação aos parâmetros financeiros, foram listados, na Tabela 15, os resultados da variação do Custo de capital, o que pode ser verificado graficamente nas Figuras 47 a 49. Conforme detalhado anteriormente, na seção 3.2.2, o Custo de capital, correspondente ao CMPC, é calculado pela média ponderada entre a taxa de juros e o prêmio pelo risco assumido frente ao desempenho econômico do projeto de investimento.

Tabela 15 – Variação dos resultados em função do custo de capital.

(continua)

Parâmetros de saída/ Resultados					
Custo de capital	LCOE	Investimento Recomendado	VPL	CAUE	<i>Payback</i> simples
%	R\$/kWh	10⁶ R\$	10⁶ R\$	10⁶ R\$	anos
7	0,87	32,9	16,9	1,9	7,62
8,5	0,95	29,4	13,4	2,1	8,07
10	1,04	26,5	10,4	2,3	8,61
11,5	1,13	24	7,9	2,5	9,26

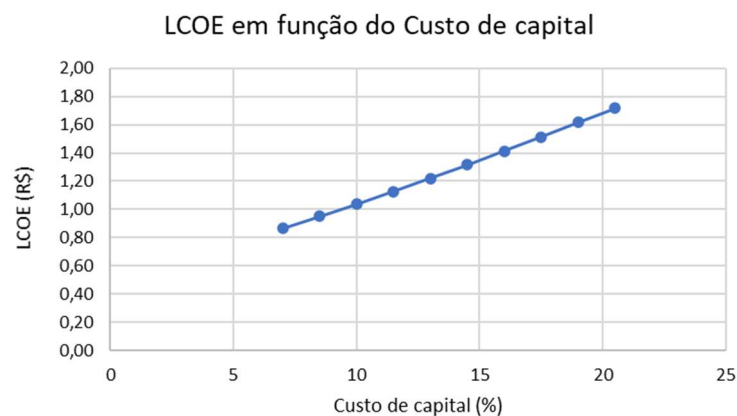
Tabela 15 – Variação dos resultados em função do custo de capital.

(conclusão)

Custo de capital	Parâmetros de saída/ Resultados				
	LCOE	Investimento Recomendado	VPL	CAUE	<i>Payback</i> simples
	%	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	10 ⁶ R\$	anos
13	1,22	21,8	5,8	2,7	10,07
14,5	1,32	20	4	2,9	11,17
16	1,41	18,4	2,4	3,1	12,74
17,5	1,51	17,1	1	3,3	15,41
19	1,61	15,9	-0,2	3,5	N/A
20,5	1,72	14,8	-1,2	3,7	N/A

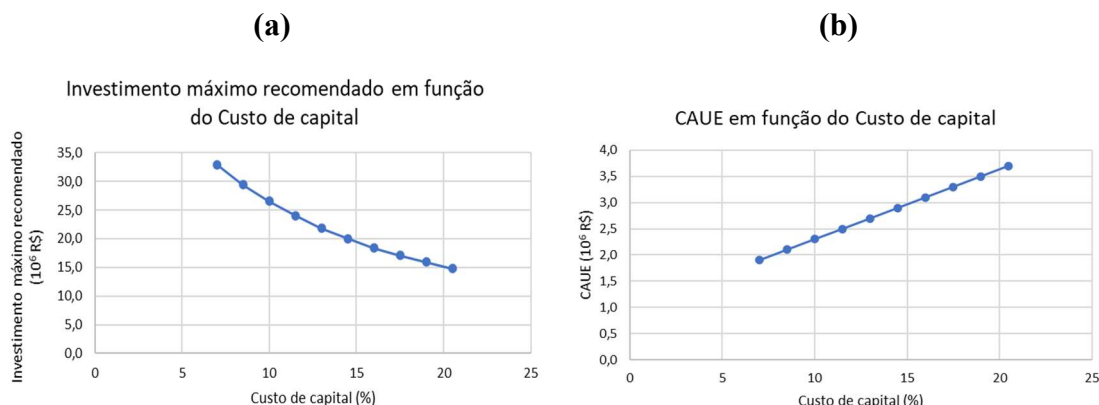
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 47 – Influência do custo de capital no LCOE.

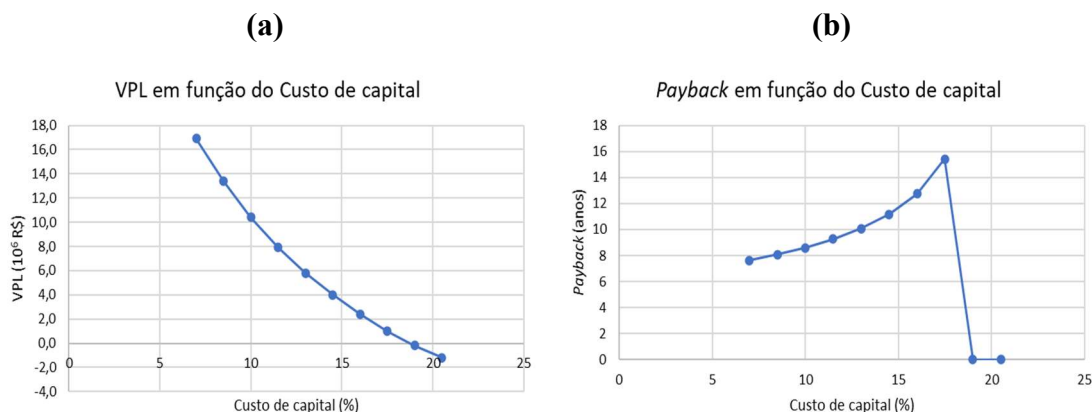


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 48 – Influência do custo de capital no investimento máximo (a) e no CAUE (b).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 49 – Influência do custo de capital no VPL (a) e no *payback* (b).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Conforme pôde ser observado a partir dos resultados apresentados na Tabela 15 e nas Figuras 47 a 49, o aumento do Custo de capital reduz a atratividade do projeto, uma vez que aumenta o custo do kWh produzido pelo ORC e os custos anuais relativos ao investimento. Percebe-se, também, redução do VPL e aumento do período de *payback*. Especificamente nas Figuras 49-a e 49-b, nota-se que Custo de Capital a partir de 19% torna o VPL negativo, fazendo com que não seja possível o retorno do investimento no período de vida útil do sistema.

Assim como foi visto nas seções anteriores, cenários de investimento a longo prazo são suscetíveis a imprevisibilidades, tais como crises financeiras, desastres naturais, instabilidade política, etc. Tais imprevisibilidades podem causar flutuação na Taxa de juros e/ou na TMA, que compõem o CMPC (ou Custo de Capital), conseqüentemente alterando os indicadores financeiros aqui estudados, por exemplo VPL e *Payback*.

Em resumo, foi possível perceber, pelos gráficos gerados a partir dos resultados em função da variação de diversos parâmetros operacionais e financeiros, que podem haver condições desfavoráveis para que se decida investir em um sistema de recuperação de calor a partir de gases residuais, como é o caso do ORC. Conforme já foi mencionado anteriormente, tais soluções são projetadas, dimensionadas e fabricadas sob medida, para condições específicas de operação, de modo que nem sempre haja margem de manobra em termos de ajustes dos parâmetros operacionais para que o investimento seja financeiramente viável. Por outro lado, o cenário econômico é bastante dinâmico, com variáveis importantes para viabilização do projeto, tais como taxa de câmbio, juros ou o preço do kWh pago à concessionária.

Para melhor visualização da influência de cada variável de entrada nos resultados, foram elaborados os Quadros 7 e 8, que exibem, respectivamente, os resultados operacionais e financeiros para o ciclo. As células sombreadas representam situações indiferentes ou desfavoráveis ao projeto de investimento.

Quadro 7 – Resumo da influência das variáveis nos resultados operacionais.

Variável de entrada	Tendência	Resultados operacionais			
		Eficiência	Potência	Produção de energia	Redução percentual do consumo
Regime de trabalho	Maior	---	---	Aumenta	Aumenta
	Menor	---	---	Diminui	Diminui
Temperatura	Maior	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
	Menor	Diminui	Diminui	Diminui	Diminui
Vazão	Maior	---	Aumenta	Aumenta	Aumenta
	Menor	---	Diminui	Diminui	Diminui
Consumo da concessionária	Maior	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui
	Menor	Diminui	Diminui	Diminui	Aumenta

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 8 – Resumo da influência das variáveis nos resultados financeiros.

Variável de entrada	Tendência	Resultados Financeiros					
		Invest. Estimado	CAUE	Investimento máximo recomendado	VPL	LCOE	Payback
Regime de trabalho	Maior	---	---	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
	Menor	---	---	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
Temperatura	Maior	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
	Menor	Diminui	Diminui	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
Vazão	Maior	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
	Menor	Diminui	Diminui	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
Preço do kWh	Maior	---	---	Aumenta	Aumenta	---	Diminui
	Menor	---	---	Diminui	Diminui	---	Aumenta
Consumo da concessionária	Maior	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
	Menor	Diminui	Diminui	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
Cotação do dólar	Maior	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
	Menor	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
Alavancagem	Maior	---	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui
	Menor	---	Aumenta	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
Custo de capital	Maior	---	Aumenta	Diminui	Diminui	Aumenta	Aumenta
	Menor	---	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui	Diminui

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Por fim, não se deve perder de vista que uma premissa de suma importância para elaboração desse projeto foi o estabelecimento de um limite máximo para geração de eletricidade, uma vez que a venda do kWh à concessionária geralmente ocorre a um valor inferior ao de compra; além disso, essa premissa elimina a possibilidade de alteração da atividade fim da indústria, foco do presente trabalho, que é a produção de bens manufaturados, e não a produção de eletricidade.

Ademais, deve ser salientado que esse limite de produção energética pode gerar restrições aos diversos resultados do ciclo, tais como potência, investimento estimado, LCOE, VPL e *Payback*. Dessa forma, é possível concluir que uma análise de viabilidade para implantação de ORC envolve um grande número de fatores e indicadores, de ordem ambiental, técnica e financeira, que devem ser considerados e analisados de maneira conjunta, mediante cada cenário operacional e financeiro disponível, de modo que seja possível aos investidores tomar decisões importantes quanto à aplicação de recursos financeiros para aumento da riqueza das empresas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico, foram apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da elaboração do presente trabalho, bem como sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A partir do trabalho desenvolvido, foi possível construir uma ferramenta relativamente simples para análise técnica e financeira para implantação de um sistema de recuperação de energia residual de gases quentes, baseado no ORC, mediante preenchimento de dados operacionais e financeiros.

Foi modelado técnica e economicamente o sistema ORC, por meio da aplicação das leis da Termodinâmica e de teorias utilizadas na análise de viabilidade econômica e financeira de projetos, de modo a permitir a estruturação da planilha eletrônica proposta. Para isso, foram adotadas premissas de funcionamento do ciclo, de modo ser possível a utilização de funções básicas de cálculo, permitindo a simulação de milhares de ORCs simultaneamente, mesmo em computadores pessoais comuns.

Pelo presente estudo, foi possível confirmar a importância dos ORCs para o mercado de energia renovável e que, sob condições técnicas e econômicas específicas, podem se apresentar como uma opção viável para geração de eletricidade a partir de calor residual. Além disso, foi possível verificar a influência de parâmetros operacionais e financeiros no teor de energia térmica reaproveitada e o impacto econômico e ambiental possível quando da implantação de sistemas ORC em indústrias térmicas. Por meio da simulação de dois cenários distintos, percebeu-se que, sob determinadas condições operacionais, pode ser percebida viabilidade econômica e financeira na instalação de um ORC para geração de eletricidade, notadamente em situações de elevado calor residual disponível e elevadas taxas de câmbio e preço do kWh adquirido da concessionária.

Salienta-se que a geração de energia pode representar significativo impacto positivo nos resultados financeiros, uma vez que, a partir dessa energia, pode-se suprir parcial ou totalmente a eletricidade consumida a partir da concessionária local. Uma vez que os recursos financeiros envolvidos são substanciais, destaca-se a importância de analisar as opções de investimento de maneira pormenorizada e com sólido embasamento técnico e financeiro, de modo a otimizar a aplicação de capital.

Deve ser mencionado que o trabalho apresenta limitações metodológicas, em função da pandemia de Covid-19, que, em pleno período de desenvolvimento dos estudos, causou distúrbios no andamento dos trabalhos, especialmente no que diz respeito ao estudo de casos que permitiria uma etapa de validação do estudo em casos reais.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para desenvolvimento de trabalhos futuros, podem ser listados:

- a) implementação de configurações adicionais de ORC na planilha, tais como recuperação ou regeneração;
- b) adoção de premissas mais próximas aos casos reais de funcionamento, como dissipação de calor, perdas de carga nas tubulações e incrustações nos trocadores de calor;
- c) aumento na gama de fluidos possíveis, como por exemplo famílias de fluidos isentrópicos ou úmidos;
- d) aumento da quantidade de informações preenchidas pelos usuários, tais como composição química dos gases de exaustão, pressão e temperatura ambientes, CEPCI, temperaturas de entrada e saída da água de resfriamento, etc.;
- e) inclusão de formas adicionais de aproveitamento de calor, por meio de irradiação solar ou queima de biomassa, por exemplo;
- f) aplicação do produto técnico em casos reais de indústrias térmicas, tais como siderúrgicas, fábricas de cal ou cimento;
- g) inclusão de cálculos e resultados relativos à geração de excedente de eletricidade produzida pelo ORC;
- h) inclusão de possibilidade de expansões na planta industrial, com aumento do consumo de energia elétrica da concessionária e simulação de novos cenários;
- i) inclusão de coeficientes inflacionários em relação às tarifas pagas à concessionária de energia elétrica;
- j) realizar estudos que incluam orçamentos atualizados para o investimento inicial do ORC, de modo a validar os valores obtidos por meio dos modelos de estimativas de custos de aquisição.

6 PRODUTO TÉCNICO E TECNOLÓGICO

Programas de Mestrado Profissional requerem a elaboração de um Produto Técnico e Tecnológico (PTT), conforme estabelecido pela CAPES. Para o presente trabalho, conforme mencionado anteriormente, foi elaborada uma ferramenta computacional, sob a forma de uma planilha de cálculos, para análise de viabilidade técnica e financeira quanto à implantação de ORC para geração de eletricidade a partir da energia térmica residual presente em gases de exaustão, típicos em indústrias térmicas, tais como siderúrgicas, fábricas de cal ou cimento.

6.1 Apresentação do PTT

O Quadro 9 descreve a ficha técnica do Produto Técnico elaborado para cumprimento do objetivo proposto anteriormente. Dessa forma, foi possível associar o objetivo da dissertação com as exigências da CAPES em relação a programas de Mestrado Profissional.

Quadro 9 – Ficha Técnica do PTT

Título do produto	Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para implantação de ORC básico
Nome do autor	Maurício Lourenço Jorge
Orientador	Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio
Coorientador	Prof. Dr. Lélis Pedro de Andrade
Subtipo e natureza do produto técnico, segundo CAPES	Subtipo: <i>Software</i> / aplicativo; Natureza: computacional

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.2 Características do PTT

Dentro da classificação de subtipo *software* (caracterizando, assim, consonância com a linha de pesquisa Tecnologia Ambiental), é importante ressaltar que, nesse caso particular, se trata de planilha eletrônica/ computacional, para plataformas PC que trabalhem em ambiente Windows®. Além disso, o PTT será disponibilizado de maneira irrestrita, gratuitamente, com divulgação por meio do sítio eletrônico do MPSTA (<https://www.bambui.ifmg.edu.br/portal/mestrado/producoes-tecnicas>).

As principais características envolvidas na elaboração de um PTT, segundo definições da CAPES, são: impacto, aplicabilidade, inovação e complexidade. No caso da planilha desenvolvida para esta dissertação, pode-se considerar que possui impacto moderado, especialmente sob os aspectos ambiental, econômico e acadêmico, uma vez que sua aplicação, até certo ponto restrita, pode vir a estimular disseminação de tecnologias de reaproveitamento energético a médio/ longo prazo, contribuindo com a redução do consumo de recursos naturais e com melhores resultados financeiros das empresas, ou ainda estimular atividades acadêmicas nas áreas térmica e econômica. Sobre o quesito aplicabilidade, pode ser considerada também moderada, pois, apesar da facilidade de utilização, o PTT ainda se encontra relativamente restrito ao meio industrial ou acadêmico, limitando sua abrangência. Como principal público alvo, têm-se gestores e profissionais do setor privado, especialmente de empresas que possuam processos térmicos, além de docentes e estudantes de engenharia mecânica e áreas afins. Para essas pessoas, a planilha pode oferecer um meio rápido para analisar a viabilidade de aproveitamento do calor residual de processos (em situações de estudos de investimentos futuros), ou ainda uma ferramenta didática para aplicar e estudar conceitos de Termodinâmica e/ou Finanças (em situações acadêmicas como aulas, minicursos, palestras e oficinas).

Tendo em vista que, para desenvolvimento da planilha, foram adaptados e integrados conhecimentos já existentes, pode-se considerar que o PTT elaborado apresenta caráter inovador moderado. Da mesma forma, considera-se moderado teor de complexidade, já que houve pouca interação entre atores para desenvolvimento da planilha, limitando-se ao próprio autor, orientador e coordenador do trabalho; além disso, a planilha possui utilização descomplicada e funções que impedem preenchimento incorreto de informações, evitando resultados pouco confiáveis.

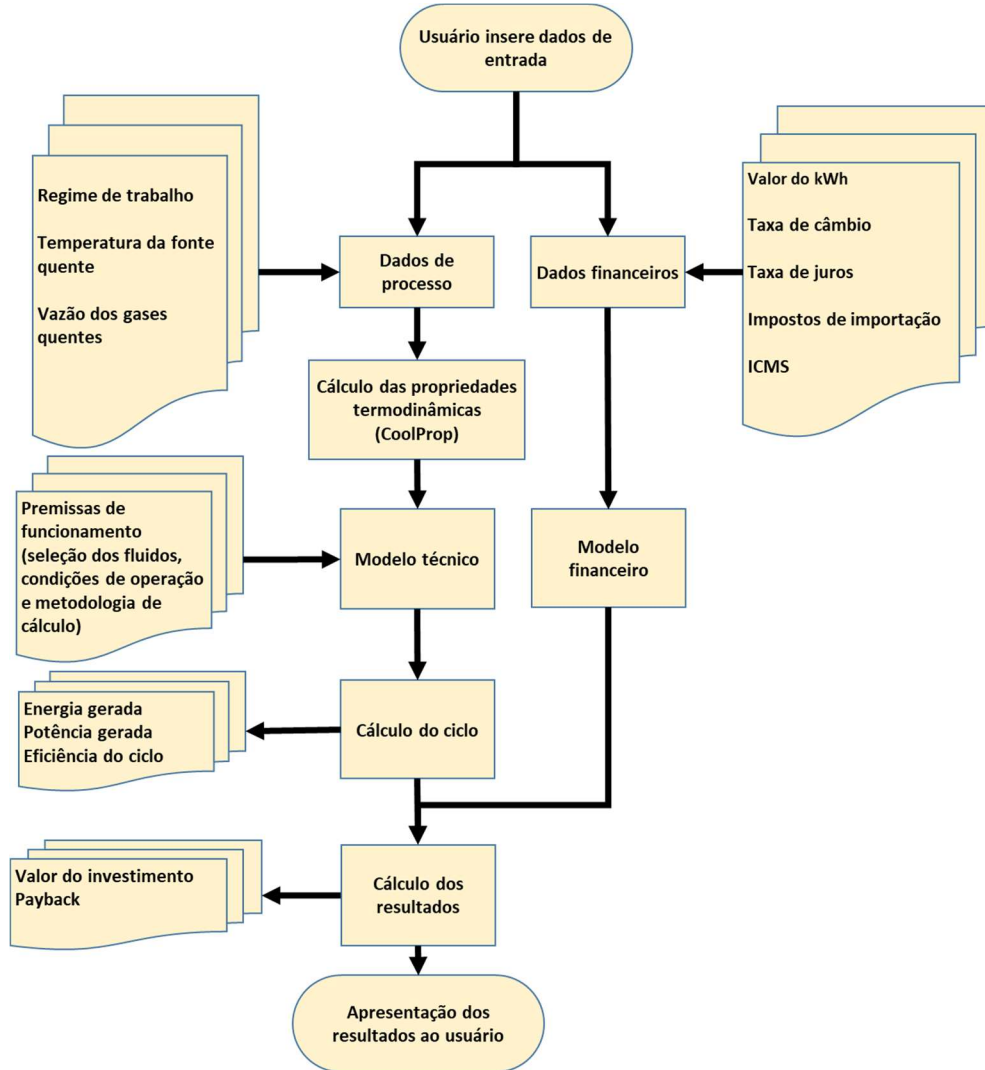
Uma vez definido o objetivo do PTT, isto é, permitir a análise técnica e financeira da implantação de ORC em cenários específicos, foi utilizado o fluxograma ilustrado na Figura 50, que demonstra de maneira representativa a linha de raciocínio para estruturação da ferramenta, envolvendo as etapas de preenchimento de informações, cálculo do ciclo e apresentação dos resultados ao usuário.

Uma das premissas adotadas foi a concepção desta planilha para utilização em computadores pessoais comuns, por usuários com nível básico de conhecimento em informática. Dessa forma, foi utilizado o *software* Microsoft Excel® para estruturação da ferramenta.

Foi necessário, para cálculo de propriedades termodinâmicas dos fluidos orgânicos, incorporar ao Excel o pacote *CoolProp*, que é um complemento gratuito de fácil instalação. Para que a planilha funcione adequadamente, é necessário que o usuário instale esse complemento em

seu computador; foram elaboradas instruções específicas para esse fim, a serem fornecidas juntamente com a planilha, em um arquivo em formato pdf.

Figura 50 – Fluxograma para elaboração da planilha de cálculo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A planilha encontra-se estruturada em 4 abas principais:

- a) a aba Apresentação exibe informações a respeito do contexto de utilização da ferramenta, bem como a versão vigente e dados de autoria e contato, conforme mostra a Figura 51;
- b) a aba Interface Usuário é a aba principal para utilização. É nessa aba que se encontram os campos para preenchimento (dados de entrada) e onde ocorre a exibição dos resultados dos cálculos realizados;

A região à esquerda, sombreada em amarelo, contém os campos para preenchimento por parte do usuário, enquanto a região à direita, sombreada em alaranjado, contém os campos onde são exibidos os resultados calculados em função dos cálculos realizados em segundo plano.

Os campos para preenchimento possuem algumas funções para evitar erros quanto ao formato dos dados. Conforme exibido na Figura 53, existem mensagens de entrada para orientar o usuário, bem como mensagens de erro no caso de preenchimento incorreto (Figura 54). Adicionalmente, podem ser exibidas ainda mensagens que orientam quanto ao preenchimento correto de parâmetros de entrada (Figura 55).

Figura 53 – Exemplo de mensagem orientativa para entrada de dados.

Dados de entrada	
Regime de trabalho	
Horas trabalhadas por ano (média)	<input type="text"/> Falta preencher
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	<input type="text"/> Falta preencher
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	<input type="text"/> Falta preencher
Consumo de energia	
Consumo de eletricidade atual [kWh/mês]	<input type="text"/>
Valor do kWh [R\$] pago à concessionária	<input type="text"/>

Fonte de calor
 Insira a temperatura dos gases quentes (valor médio), em graus Celsius (°C), entre 100 e 350 °C. Valores muito baixos são inviáveis para extração de eletricidade; para valores muito elevados, existem soluções mais interessantes que o ORC.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 54 – Exemplo de mensagem de erro em caso de preenchimento incorreto.

Dados de entrada	
Regime de trabalho	
Horas trabalhadas por ano (média)	<input type="text"/> Falta preencher
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	<input type="text" value="50"/> Falta preencher
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	<input type="text"/>
Consumo de energia	
Consumo de eletricidade atual [kWh/mês]	<input type="text"/>
Valor do kWh [R\$] pago à concessionária	<input type="text"/>

Erro ✕

Deve ser preenchido um valor numérico entre 100 e 350.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 55 – Exemplo de mensagem informando preenchimento realizado.

Dados de entrada	
Regime de trabalho	
Horas trabalhadas por ano (média)	<input type="text"/> Falta preencher
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	<input type="text" value="180"/> Preenchimento OK!
	Falta preencher corretamente
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	<input type="text"/> <input type="text"/>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Após os campos obrigatórios serem preenchidos, a planilha já pode realizar os cálculos e retornar os resultados; os campos de preenchimento opcional possuem valores padrão que são assumidos, caso sejam deixados em branco. A Figura 56 mostra a planilha preenchida e com resultados exibidos, com dados ilustrativos.

Figura 56 – Exemplo de preenchimento e exibição de resultados.

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para implantação de ORC básico		Projeto não recomendado (VPL negativo e/ou Investimento acima do valor recomendado)	
Dados de entrada		Resultados Estimados	
Regime de trabalho		Fluido recomendado	D5
Horas trabalhadas por ano (média)	<input type="text" value="8.480"/> Preenchimento OK!	Eficiência do ciclo	5,31 %
Temperatura dos gases de exaustão [°C]	<input type="text" value="180"/> Preenchimento OK!	Potência elétrica gerada	44,12 kW
	Preenchimento OK!	Energia elétrica produzida por mês	31.176 kWh/mês
Vazão dos gases de exaustão (valor e unidade)	<input type="text" value="42.000"/> <input type="text" value="m3/h"/>	Energia elétrica produzida por ano	374.107 kWh/ano
		Redução no consumo de eletricidade	99,92% %
Consumo de energia		Demanda projetada da concessionária	293 kWh/ano
Consumo de eletricidade atual [kWh/mês]	<input type="text" value="26.000"/> Preenchimento OK!	Despesa projetada com a concessionária	424,95 R\$/ano
Valor do kWh [R\$] pago à concessionária	<input type="text" value="1,45000"/> Preenchimento OK!	Custo de capital	12,30 %/ano
Taxas e impostos		Investimento máximo recomendado	2.369.130 R\$
Cotação do dólar [R\$]	<input type="text" value="5,21"/> Preenchimento OK!	Investimento total	9.266.007 R\$
Impostos de importação [%]	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Investimento total - capital próprio	6.486.205 R\$
ICMS [%]	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Investimento total - capital de terceiros	2.779.802 R\$
IOF [%]	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Pagamentos anuais para terceiros	151.865 R\$/ano
Alíquota Imposto de Renda [%]	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	1.483.216 R\$/ano
Alavancagem [%]	<input type="text" value="30,00%"/> Preenchimento OK!	Despesas anuais - Operação/ Manutenção	219.296 R\$/ano
Taxa de juros anual [%]	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Custo Nivelado de Energia (LCOE)	3,965 R\$/kWh
Prêmio pelo risco	<input type="text"/> Preenchimento opcional	Valor Presente Líquido	-6.896.878 R\$
		Payback simples	N/A anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os dados preenchidos na interface do usuário são transportados para a aba Ciclos, onde são realizados os cálculos termodinâmicos. Essa aba foi estruturada com base nas premissas assumidas pelo ciclo e já descritas anteriormente. Cada um dos 31 fluidos selecionados é listado com valores específicos de temperaturas, de modo que haja um total de quase 9.000 linhas e 120 colunas, com um grande número de combinações de parâmetros, realizando aproximadamente 500.000 cálculos a cada preenchimento. Uma vez estabelecido o critério de maior redução percentual do consumo de eletricidade, sem que haja excedente, é escolhido o ciclo com a melhor classificação, dentro dessa premissa. Os demais resultados correspondentes são, então, transportados novamente para a aba Interface do usuário. A Figura 57 exibe um pequeno trecho da aba Ciclos, uma vez que a planilha é excessivamente extensa para exibição completa.

Figura 57 – Aba de cálculos termodinâmicos e econômicos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os últimos cálculos necessários são realizados na aba Financeira, onde são construídos os Fluxos de Caixa e é calculado o VPL para o ciclo escolhido, mediante as premissas assumidas ao longo do trabalho. A Figura 58 exhibe o conteúdo dessa aba.

Figura 58 – Aba de cálculos do fluxo de caixa e VPL.

Cálculos e Resultados Financeiros do Investimento	
Cálculos:	
Economia anual	323.159 RS/ano
Período	20 anos
Taxa de reinvestimento usual	9,00%
Investimento recomendado	2.369.130 RS
VPL	-8.493.819,71 RS
TIR	-3,210% RS

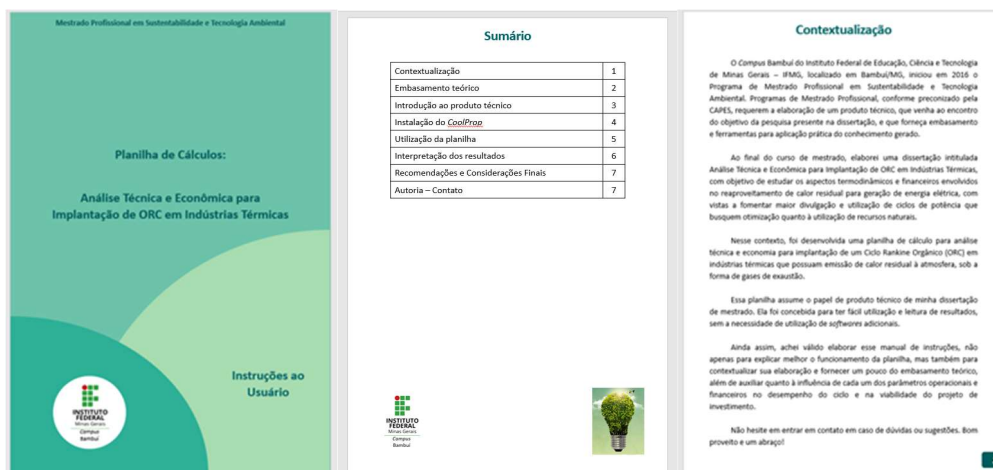
Fluxo de Caixa Uniforme:				
Ano	Valor	Fluxo acumulado	Saldo	Cálculo manual do payback
0	-9.266.007	-9.266.007,41	-9.266.007	
1	323.159	-8.942.848,26	-8.942.848,26	
2	323.159	-8.619.689,11	-8.619.689,11	
3	323.159	-8.296.529,96	-8.296.529,96	
4	323.159	-7.973.370,81	-7.973.370,81	
5	323.159	-7.650.211,66	-7.650.211,66	
6	323.159	-7.327.052,51	-7.327.052,51	
7	323.159	-7.003.893,36	-7.003.893,36	
8	323.159	-6.680.734,21	-6.680.734,21	
9	323.159	-6.357.575,06	-6.357.575,06	
10	323.159	-6.034.415,91	-6.034.415,91	
11	323.159	-5.711.256,76	-5.711.256,76	
12	323.159	-5.388.097,61	-5.388.097,61	
13	323.159	-5.064.938,46	-5.064.938,46	
14	323.159	-4.741.779,31	-4.741.779,31	
15	323.159	-4.418.620,16	-4.418.620,16	
16	323.159	-4.095.461,01	-4.095.461,01	
17	323.159	-3.772.301,86	-3.772.301,86	
18	323.159	-3.449.142,71	-3.449.142,71	
19	323.159	-3.125.983,56	-3.125.983,56	
20	323.159	-2.802.824,41	-2.802.824,41	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Por fim, é necessário ressaltar que a escolha pela utilização do Microsoft Excel® se deveu ao fato de ser um *software* amplamente difundido e utilizado, dispensando aquisição de programas adicionais. Como ressalva, salienta-se a necessidade de instalação de um complemento chamado *CoolProp*, que adiciona algumas funções necessárias à determinação de

propriedades termodinâmicas dos fluidos, tais como entalpia, temperatura, pressão e entropia, essenciais para o cálculo dos ciclos. Esse módulo é gratuito e de fácil instalação, cujos detalhes adicionais, assim como orientações mais detalhadas quanto à utilização do produto técnico, encontram-se em um arquivo de texto, no formato pdf, fornecido juntamente com a planilha. As três primeiras páginas do Manual do Usuário podem ser vistas na Figura 59.

Figura 59 – Arquivo com instruções para utilização da planilha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Designation and Safety Classification of Refrigerants Ashrae**. Standard 34-2019, 2019. Georgia: ASHRAE, 2019. Disponível em: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_34_2019. Acesso em: 10 ago. 2021.
- ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2014. 824 p.
- BAO, J.; ZHAO, L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 325–342, ago. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113001998>. Acesso em: 13 out. 2018.
- BELL, I. *et. al.* Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 6, n. 6, p.2498-2508, 2014. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>. Acesso em: 24 out. 2021.
- BLANCO, E. E.; OCHOA, G. V.; FORERO, J. D. Thermodynamic, Exergy and Environmental Impact Assessment of S-CO₂ Brayton Cycle Coupled with ORC as Bottoming Cycle. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2259. <https://doi.org/10.3390/en13092259>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2259#cite>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- BOLAJI, B. O.; HUAN, Z. Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 49–54, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112005503>. Acesso em: 07 dez. 2018.
- BRUNI, A.L. **Avaliação de Investimentos**. São Paulo: Atlas S.A, 2008. 519 p.
- CASSAROTO FILHO, N.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de Investimentos**. 8 ed. São Paulo: Atlas, 1998. 458 p.
- CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. 2021. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- CHEMICAL ENGINEERING. **The chemical engineering plant cost index**. 2021. Disponível em: <https://www.chemengonline.com/pci-home>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- CHEN, H.; GOSWAMI, D. Y.; STEFANAKOS, E. 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, dez. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110001863>. Acesso em: 22 out. 2019.
- DALAL-CLAYTON, B.; BASS, S. **Sustainable development strategies: a resource book**. London: Earthscan, 2002.

DAMODARAN, A. **Applied corporate finance**. 4 ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2015. 654 p.

DESAI, N. B.; BANDYOPADHYAY, S. Process integration of organic Rankine cycle. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1674–1686, out. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544209002205>. Acesso em: 07 dez. 2018.

FENG, Y. *et al.* Comparison between regenerative organic Rankine cycle (RORC) and basic organic Rankine cycle (BORC) based on thermoeconomic multi-objective optimization considering exergy efficiency and levelized energy cost (LEC). **Energy Conversion and Management**, v. 96, p. 58–71, maio 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890415001582>. Acesso em: 13 abr. 2019.

GARCÍA-SERNA, L; PÉREZ-BARRIGÓS, L.; COCERO, M. J. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. **Chemical Engineering Journal**, v. 133, p. 7-30, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894707001192?via%3Dihub>. Acesso em: 09 fev. 2021.

HUNG, T. C. *et al.* A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources. **Energy**, v. 35, n. 3, p. 1403–1411, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544209005143>. Acesso em: 12 out. 2018.

IMRAN, M. *et al.* Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 107–118, nov. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890414006165>. Acesso em: 07 dez. 2018.

IZIDORO, D. L. **Recuperação de calor residual de baixa qualidade em usinas termelétricas de ciclo combinado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/585/dissertacao_izidoro_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 set. 2018.

JUNG, H.-C.; TAYLOR, L.; KRUMDIECK, S. An experimental and modelling study of a 1 kW organic Rankine cycle unit with mixture working fluid. **Energy**, v. 81, p. 601–614, jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215000109>. Acesso em: 22 out. 2019.

KAŞKA, Ö. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 108–117, jan. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890413005633>. Acesso em: 12 out. 2019.

KÖLSCH, B.; RADULOVIC, J. Utilisation of diesel engine waste heat by Organic Rankine Cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 78, p. 437–448, mar. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115000083>. Acesso em: 07 dez. 2018.

LAI, N. A.; WENDLAND, M.; FISCHER, J. Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles. **Energy**, v. 36, n. 1, p. 199–211, jan. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210006146?via%3Dihub>. Acesso em: 12 out. 2018.

LE, V. L. *et al.* Performance optimization of low-temperature power generation by supercritical ORCs (organic Rankine cycles) using low GWP (global warming potential) working fluids. **Energy**, v. 67, p. 513–526, abr. 2014. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v67y2014icp513-526.html>. Acesso em: 08 nov. 2018.

LECOMPTE, S. *et al.* Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 448–461, jul. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115002427>. Acesso em: 10 out. 2018.

LIVERMAN, D. M. *et al.* Global sustainability: toward measurement, **Environ. Manage**, v. 12, n. 12, p. 133-143, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fbfb01873382>. Acesso em: 12 abr. 2021.

LI, S.; DAI, Y. Thermo-economic comparison of Kalina and CO₂ transcritical power cycle for low temperature geothermal sources in China. **Applied Thermal Engineering**, v. 70, n. 1, p. 139–152, set. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114003317>. Acesso em: 21 out. 2019.

LIU, C. *et al.* The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment. **Energy**, v. 56, n. 1, p. 144-154, jul. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544213003563?via%3Dihub>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MACCHI, E.; ASTOLFI, M. **Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications**. [s. l.]: Elsevier, 2016. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/organic-rankine-cycle-orc-power-systems/macchi/978-0-08-100510-1>. Acesso em 13 out. 2020.

MEINEL, D.; WIELAND, C.; SPLIETHOFF, H. Economic comparison of ORC (Organic Rankine cycle) processes at different scales. **Energy**, v. 74, p. 694–706, set. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272383104_Economic_comparison_of_ORC_Organic_Rankine_cycle_processes_at_different_scales. Acesso em: 05 dez. 2019.

NOUMAN, J. **Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles – ORC**. Stockholm, 175 p., 2012. Thesis (Division of Thermodynamics and Refrigeration), KTH School of Industrial Engineering and Management, KTH Royal Institute of Technology, 2012. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:555314/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2018.

PERIS, B. *et al.* Experimental study of an ORC (Organic Rankine Cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. **Energy**, v. 85, p. 534–542, jun. 2015b. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215003746>. Acesso em: 07 nov. 2018.

PERIS, B. *et al.* Performance evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) for power applications from low grade heat sources. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 763-769, jan. 2015a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114009053>. Acesso em: 12 out. 2018.

QUOILIN, S. *et al.* Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 168–186, jun. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000592>. Acesso em: 12 out. 2018.

QUOILIN, S. *et al.* Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 2885–2893, out. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431111002663>. Acesso em: 10 out. 2018.

QUOILIN, S. **Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications**. Presented to the Faculty of Applied Science of the University of Liège, Belgium, 2011. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/58881261.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2020.

RAYEGAN, R.; TAO, Y. X. A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs). **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 659–670, fev. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110003344>. Acesso em: 10 out. 2018.

REGULAMENTO (CE) n° 2037/2000 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de junho de 2000, relativo às substâncias que empobrecem a camada de ozônio. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e7916be1-fd73-4b66-9902-43a451b6254f/language-pt>. Acesso em: 20 set. 2020.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J.; JORDAN, B. D. **Corporate finance: core principles and applications**. 5 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 721 p.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Painel empresas: total de empresas**. DataSebrae. 2021. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/totaldeempresas-11-05-2020/>. Acesso em: 09 ago. 2021.

SISCOMEX. **Imposto de importação**. 2021. Disponível em: <https://portalunico.siscomex.gov.br/classif/#/sumario?perfil=publico>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: Fundamentos técnicas e aplicações**. 6 ed. São Paulo: Atlas S.A., 2009. 186 p.

SPROUSE, C.; DEPCIK, C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, vol. 51, pp. 711 – 722, 2013. Disponível em: <https://me.engr.ku.edu/depcik-article-2013-2>. Acesso em: 08 nov. 2018.

STOPPATO, A.; BENATO, A. Life Cycle Assessment of a Commercially Available Organic Rankine Cycle Unit Coupled with a Biomass Boiler. **Energies**, v. 13, n. 7, 2020; p.1835. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13071835>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SUN, J.; LI, W. Operation optimization of an organic rankine cycle (ORC) heat recovery power plant. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 11-12, p. 2032–2041, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943111100144X>. Acesso em: 02 dez. 2018.

TCHANCHE, B. F. *et al.* Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p. 2468–2476, ago. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431108004900>. Acesso em: 10 out. 2018.

TCHANCHE, B. F. *et al.* Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3963–3979, out. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111002644>. Acesso em: 12 out. 2018.

TCHANCHE, B. F.; PÉTRISSANS, M.; PAPADAKIS, G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1185– 1199, nov. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005917>. Acesso em: 12 out. 2018.

TIAN, H.; WANG, X.; SHU, G.; WU, M.; YAN, N.; MA, X. A Quantitative Risk-Assessment System (QR-AS) Evaluating Operation Safety of Organic Rankine Cycle using Flammable Mixture Working Fluid. **Journal of Hazardous Materials**. vol. 338. p. 394-409, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28591683>. Acesso em: 13 out. 2018.

TURTON, R. *et al.* **Analysis, Synthesis, and design of Chemical Processes**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2018.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2018 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee**. Nairobi: UNEP, 2018. Disponível em: https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-04/RTOC-assessment-report-2018_0.pdf. Acesso em: 09 fev. 2021.

UUSITALO, A. *et al.* Greenhouse gas reduction potential by producing electricity from biogas engine waste heat using organic Rankine cycle. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, 2016. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.03.125. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/300408187_Greenhouse_gas_reduction_potential_by_producing_electricity_from_biogas_engine_waste_heat_using_organic_Rankine_cycle. Acesso em: 12 abr. 2021.

VÉLEZ, F. *et al.* A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4175–4189, ago. 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112002055>. Acesso em: 10 out. 2018.

VICTOR, R. A.; KIM, J.-K.; SMITH, R. Composition optimisation of working fluids for Organic Rankine Cycles and Kalina cycles. **Energy**, v. 55, p. 114–126, jun. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421300265X>. Acesso em: 12 out. 2018.

XI, H. *et al.* A graphical criterion for working fluid selection and thermodynamic system comparison in waste heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 89, p. 772–782, out. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115006080>. Acesso em: 17 out. 2019.

YU, C.; XU, J.; SUN, Y. Transcritical pressure Organic Rankine Cycle (ORC) analysis based on the integrated-average temperature difference in evaporators. **Applied Thermal Engineering**, v. 88, p. 2–13, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431114010291>. Acesso em: 13 abr. 2019.

ZHANG, H.; GUAN, X.; DING, Y.; LIU, C. Energy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation. **Journal of Cleaner Production**. vol. 183, p. 1207-1215, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323281875_Emergy_analysis_of_Organic_Rankine_Cycle_ORC_for_waste_heat_power_generation. Acesso em: 15 out. 2020.

ZHITONG, Y.; XIANGLONG, L.; ZHI, Y.; CHAO, W.; JIANYONG, C.; YING, C.; PONCE-ORTEGA, J. M. Thermo-economic-environmental optimization of a liquid separation condensation-based organic Rankine cycle driven by waste heat. **Journal of Cleaner Production**, vol. 184, p. 198-210, may, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618301094>. Acesso em: 13 out. 2018.

ZHOU, Najun; WANG, Xiaoyuan; CHEN, Zhuo; WANG, Zhiqi. Experimental study on Organic Rankine Cycle for waste heat recovery from low-temperature flue gas. **Energy**, Vol.55, pp.216-225, June, 2013. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213002429?casa_token=GX7Gd3SHJogAAAAA:aTEYqCYKjVUX0ENMDJbtLRYR419LX0ad-pLdin_eTCEhh5g2zfb-6kFoVLZh1mTjVG0uWLkkJQ. Acesso em: 12 out. 2019.

ZIVIANI, D.; BEYENE, A.; VENTURINI, M. Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery. **Applied Energy**, v. 121, p. 79–95, maio 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360261914001044>. Acesso em: 17 out. 2019.

APÊNDICE A – LISTA DOS FLUIDOS ORGÂNICOS SELECIONADOS

Dentre os 122 fluidos orgânicos abrangidos pelo *CoolProp*, foram aplicados os critérios de seleção mencionados anteriormente, relativos aos aspectos termodinâmicos, ambientais e de segurança, conforme pode ser visto na Tabela 16.

Deve-se salientar que o *CoolProp* não possui todas as propriedades de todos os fluidos. Ainda assim, de modo a permitir a utilização de um maior número de fluidos, a ausência de alguma propriedade não foi utilizada como critério para exclusão do respectivo fluido.

As propriedades listadas na Tabela 16 são:

- T_{crit}: Temperatura crítica (em °C) – critério: exclusão caso seja inferior a 100 °C;
- ODP: Potencial de degradação da camada de ozônio – exclusão caso seja maior que 0;
- GWP100: Potencial de emissão de gases de aquecimento global – exclusão caso seja maior que 30;
- FH: Fire Hazard (risco de incêndio) – exclusão caso seja igual a 4;
- HH: Health Hazard (riscos à saúde) – exclusão caso seja igual a 4;
- classificação: comportamento do fluido – exclusão caso seja úmido ou isentrópico.

Por fim, deve ser mencionado que as células sombreadas representam os critérios de exclusão aplicados. Além disso, só foram calculados os coeficientes de inclinação da reta correspondente à região de vapor saturado para os fluidos que não foram excluídos por algum dos demais critérios.

Tabela 16 – Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no *CoolProp* e critérios de seleção.

(continua)

Fluido (nome <i>CoolProp</i>)	Nome em português	T _{crit} [°C]	ODP	GWP100	FH	HH	ξ	Classificação	Resultado
Benzene	Benzeno	289	---	---	3	2	0,9172	Seco	sem restrições
CycloHexane	Ciclohexano	280	---	---	3	1	0,6909	Seco	sem restrições
Cyclopentane	Ciclopentano	239	---	---	3	2	0,6694	Seco	sem restrições
D4	D4	313	---	---	-1	-1	0,3897	seco	sem restrições
D5	D5	345	---	---	-1	-1	0,3752	seco	sem restrições
D6	D6	373	---	---	-1	-1	0,3625	seco	sem restrições
DiethylEther	Dietil Éter (RE170; Metoximetano)	194	---	---	-1	-1	0,3333	seco	sem restrições
DimethylCarbonate	Dimetil Carbonato	284	---	---	3	2	0,7027	seco	sem restrições

Tabela 16 – Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no *CoolProp* e critérios de seleção.

(continua)

Fluido (nome <i>CoolProp</i>)	Nome em português	Tcrit [°C]	ODP	GWP100	FH	HH	ξ	Classificação	Resultado
EthylBenzene	Etil Benzeno	344	---	---	3	2	0,6728	seco	sem restrições
Isohexane	Isohexano	225	---	---	3	2	0,562	seco	sem restrições
MD2M	MD2M	326	---	---	2	1	0,3662	seco	sem restrições
MD3M	MD3M	355	---	---	2	1	0,348	seco	sem restrições
MD4M	MD4M	380	---	---	2	1	0,3395	seco	sem restrições
MDM	MDM	291	---	---	2	1	0,3808	seco	sem restrições
MethylLinoleate	Metil Linoleato	526	---	---	-1	-1	0,3227	seco	sem restrições
MethylLinolenate	Metil Linolenato	499	---	---	-1	-1	0,3566	seco	sem restrições
MethylOleate	Metil Oleato	509	---	---	1	2	0,3167	seco	sem restrições
MethylPalmitate	Metil Palmitato	482	---	---	0	1	0,3181	seco	sem restrições
MethylStearate	Metil Estearato	502	---	---	1	0	0,3078	seco	sem restrições
MM	MM	246	---	---	3	2	0,4339	seco	sem restrições
m-Xylene	m-Xileno	344	---	---	0	0	0,7178	seco	sem restrições
n-Decane	Decano	345	---	---	2	2	0,3442	seco	sem restrições
n-Dodecane	Dodecano	385	---	---	2	2	0,3119	seco	sem restrições
n-Heptane	Heptano	267	---	---	3	1	0,4602	seco	sem restrições
n-Hexane	Hexano	235	---	3,1	3	2	0,566	seco	sem restrições
n-Nonane	Nonano	321	---	---	3	2	0,3642	seco	sem restrições
n-Octane	Octano	296	---	---	3	2	0,3987	seco	sem restrições
Novec649	Novec649	169	---	---	-1	-1	0,8628	seco	sem restrições
o-Xylene	o-Xileno	357	---	---	-1	-1	0,6527	seco	sem restrições
p-Xylene	p-Xileno	343	---	---	0	0	0,7223	seco	sem restrições
Toluene	Tolueno (Metil Benzeno)	319	---	3,3	3	2	1,0114	seco	sem restrições
1-Butene	Buteno (1-Buteno)	146	---	---	4	0	---	---	Excluído
Acetone	Acetona (propanona)	235	---	0,5	3	2	-0,5023	úmido/isoentrópico	Excluído
Air	Ar (R729)	-141	---	---	0	0	---	---	Excluído
Ammonia	Amônia (R717)	132	---	---	1	3	-0,0498	úmido/isoentrópico	Excluído
Argon	Argônio (R740)	-122	---	0	0	0	---	---	Excluído
CarbonDioxide	Dióxido de Carbono (R744)	31	---	1	0	1	-0,0599	úmido/isoentrópico	Excluído
CarbonMonoxide	Monóxido de Carbono	-140	---	---	4	1	---	---	Excluído
CarbonylSulfide	Sulfeto de Carbonila	106	---	27	4	3	---	---	Excluído

Tabela 16 – Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no *CoolProp* e critérios de seleção.

(continua)

Fluido (nome <i>CoolProp</i>)	Nome em português	Tcrit [°C]	ODP	GWP100	FH	HH	ξ	Classificação	Resultado
cis-2-Butene	Cis-2-Buteno	163	---	---	4	0	---	---	Excluído
CycloPropane	Ciclopropano	125	---	---	2	2	-0,1875	úmido/isoentrópico	Excluído
Deuterium	Deutério (D)	-235	---	0	-1	-1	---	---	Excluído
Dichloroethane	Dicloroetano	288	---	---	-1	-1	-1,1035	úmido/isoentrópico	Excluído
DimethylEther	Dimetil Éter	127	---	1	4	1	---	---	Excluído
Ethane	Etano (R170)	32	---	2,9	4	1	---	---	Excluído
Ethanol	Etanol (Álcool Etilico)	242	---	---	3	2	-0,1977	úmido/isoentrópico	Excluído
Ethylene	Etileno (R1150; Eteno)	9	---	6,8	4	2	---	---	Excluído
EthyleneOxide	Óxido de Etileno	196	---	---	-1	-1	-0,2279	úmido/isoentrópico	Excluído
Fluorine	Flúor	-129	---	---	3	4	---	---	Excluído
HeavyWater	Água Pesada (óxido de deutério)	371	---	---	0	0	-0,0991	úmido/isoentrópico	Excluído
Helium	Hélio (R704)	-268	---	---	0	0	---	---	Excluído
HFE143m	HFE143m (RE143a)	105	---	---	0	0	-0,3529	úmido/isoentrópico	Excluído
Hydrogen	Hidrogênio (R702)	-240	---	---	4	0	---	---	Excluído
HydrogenChloride	Cloreto de Hidrogênio	51	---	---	-1	-1	-0,0493	úmido/isoentrópico	Excluído
HydrogenSulfide	Sulfeto de Hidrogênio	100	---	---	4	4	---	---	Excluído
IsoButane	Isobutano (R600a; 2-Metilpropano)	135	---	---	4	1	---	---	Excluído
IsoButene	Isobuteno (2- Metilpropeno)	145	---	---	4	1	---	---	Excluído
Isopentane	Isopentano	187	---	---	4	1	---	---	Excluído
Krypton	Criptônio	-64	---	---	0	0	---	---	Excluído
Methane	Metano (R50)	-83	---	25	4	0	---	---	Excluído
Methanol	Metanol (Álcool Metílico)	239	---	2,8	3	2	-0,1195	úmido/isoentrópico	Excluído
n-Butane	Butano (R600)	152	---	3	4	1	---	---	Excluído
Neon	Neônio (R720)	-229	---	---	0	0	---	---	Excluído
Neopentane	Neopentano (Dimetil propano)	161	---	---	4	1	---	---	Excluído
Nitrogen	Nitrogênio (R728)	-147	---	---	0	0	---	---	Excluído

Tabela 16 – Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no *CoolProp* e critérios de seleção.

(continua)

Fluido (nome <i>CoolProp</i>)	Nome em português	Tcrit [°C]	ODP	GWP100	FH	HH	ξ	Classificação	Resultado
NitrousOxide	Óxido Nitroso (R744a)	36	---	320	0	1	---	---	Excluído
n-Pentane	Pentano (R601)	197	---	---	4	2	---	---	Excluído
n-Propane	Propano (R290)	97	---	3	4	1	---	---	Excluído
n-Undecane	Undecano	366	---	3	4	1	---	---	Excluído
OrthoDeuterium	Orto Deutério (o- D)	-235	---	---	-1	-1	---	---	Excluído
OrthoHydrogen	Orto Hidrogênio (o-H)	-240	---	---	-1	-1	---	---	Excluído
Oxygen	Oxigênio (O)	-119	---	---	0	0	---	---	Excluído
ParaDeuterium	Para Deutério (p- D)	-235	---	---	0	0	---	---	Excluído
ParaHydrogen	Para Hidrogênio (p-H)	-240	---	---	-1	-1	---	---	Excluído
Propylene	Propileno (R1270; Propeno)	91	---	3,1	4	1	---	---	Excluído
Propyne	Propino (Metil acetileno)	129	---	---	4	1	---	---	Excluído
R11	R11	198	1	4750	1	1	---	---	Excluído
R113	R113	214	1	6130	0	1	---	---	Excluído
R114	R114	146	1	10000	0	1	---	---	Excluído
R115	R115	80	0,44	7370	-1	-1	---	---	Excluído
R116	R116	20	---	---	0	1	---	---	Excluído
R12	R12	112	1	10900	1	1	---	---	Excluído
R123	R123	184	0,02	77	1	2	---	---	Excluído
R1233zd(E)	R1233zd(E)	166	0,02	77	1	2	---	---	Excluído
R1234yf	R1234yf	95	---	4	2	1	-0,3925	úmido/isoentrópico	Excluído
R1234ze(E)	R1234ze(E)	109	---	6	2	1	-0,4351	úmido/isoentrópico	Excluído
R1234ze(Z)	R1234ze(Z)	150	---	6	2	1	-0,6408	úmido/isoentrópico	Excluído
R124	R124	122	0,022	609	1	1	---	---	Excluído
R125	R125	66	---	3500	1	1	---	---	Excluído
R13	R13	29	---	14400	-1	-1	---	---	Excluído
R134a	R134a	101	---	1430	1	1	---	---	Excluído
R13I1	R13I1	123	---	0,4	-1	-1	-0,7601	úmido/isoentrópico	Excluído
R14	R14	-46	---	7390	-1	-1	---	---	Excluído
R141b	R141b	204	0,12	725	1	1	---	---	Excluído

Tabela 16 – Lista dos fluidos orgânicos disponíveis no *CoolProp* e critérios de seleção.

(conclusão)

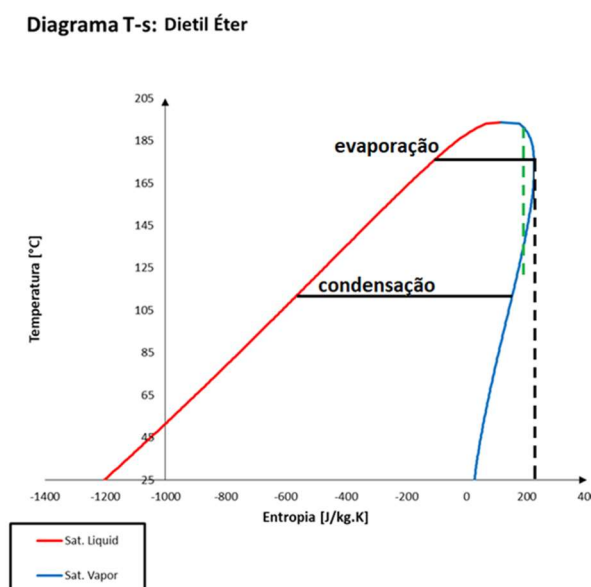
Fluido (nome <i>CoolProp</i>)	Nome em português	Tcrit [°C]	ODP	GWP100	FH	HH	ξ	Classificação	Resultado
R142b	R142b	137	0,07	2310	1	1	---	---	Excluído
R143a	R143a	73	---	4470	1	1	---	---	Excluído
R152A	R152A	113	---	124	4	1	---	---	Excluído
R161	R161	102	---	10	-1	-1	-0,1358	úmido/isoentrópico	Excluído
R21	R21	178	---	151	-1	-1	---	---	Excluído
R218	R218	72	---	8830	1	2	---	---	Excluído
R22	R22	96	0,05	1810	1	1	---	---	Excluído
R227EA	R227EA	102	---	3220	0	1	---	---	Excluído
R23	R23	26	---	14800	1	1	---	---	Excluído
R236EA	R236EA	139	---	1200	-1	-1	---	---	Excluído
R236FA	R236FA	125	---	9810	0	1	---	---	Excluído
R245ca	R245ca	174	---	---	0	-1	-0,6476	úmido/isoentrópico	Excluído
R245fa	R245fa	154	---	1030	0	2	---	---	Excluído
R32	R32	78	---	675	4	1	---	---	Excluído
R365MFC	R365MFC	187	---	794	-1	-1	---	---	Excluído
R40	R40	143	---	---	-1	-1	-0,3149	úmido/isoentrópico	Excluído
R404A	R404A	72	0	3900	1	1	---	---	Excluído
R407C	R407C	86	---	1800	1	1	---	---	Excluído
R41	R41	44	---	92	3	2	---	---	Excluído
R410A	R410A	71	---	2088	1	1	---	---	Excluído
R507A	R507A	71	---	3985	1	1	---	---	Excluído
RC318	RC318	115	---	10300	0	1	---	---	Excluído
SES36	Solkatherm SES36	178	---	10300	0	1	---	---	Excluído
SulfurDioxide	Dióxido Sulfúrico (R764)	157	---	---	0	3	-0,2229	úmido/isoentrópico	Excluído
SulfurHexafluoride	Hexafluoreto de Enxofre	46	---	22800	0	1	---	---	Excluído
trans-2-Butene	Trans-2-Buteno	155	---	---	4	0	---	---	Excluído
Water	Água (R718)	374	---	---	0	0	-0,09	úmido/isoentrópico	Excluído
Xenon	Xenônio	17	---	---	0	0	---	---	Excluído

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

APÊNDICE B – TEMPERATURA DE ENTROPIA MÁXIMA PARA OS FLUIDOS SELECIONADOS

Conforme mencionado anteriormente, o processo de expansão isentrópica é representado por uma linha vertical descendente, a partir do ponto onde o fluido encontra a linha de saturação de vapor. Para evitar quaisquer riscos de condensação durante a expansão, o que poderia ocasionar danos à turbina, foi estipulada como máxima temperatura de evaporação aquela onde a entropia também é máxima, evitando que a linha da expansão isentrópica atravesse o domo de saturação, conforme pode ser evidenciado na Figura 60, que demonstra o diagrama Temperatura-entropia para um fluido “seco”, no exemplo o Dietil Éter.

Figura 60 – Diagrama Temperatura-entropia para um fluido “seco”.

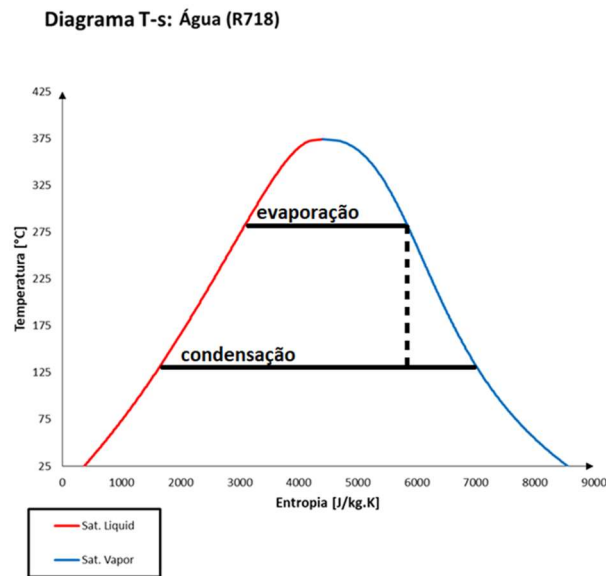


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pela análise da Figura 60, percebe-se que em fluidos com características “secas”, é possível adotar a temperatura de evaporação igual à temperatura de entropia máxima. Uma vez que a linha de expansão isentrópica (tracejada na cor preta) não atravessa o domo de saturação, garante-se que não haverá riscos de condensação na turbina. Nota-se que em temperaturas superiores a essa, a linha de expansão isentrópica atravessa o domo de saturação (tracejada na cor verde).

Por outro lado, fluidos “úmidos” ou isentrópicos podem apresentar condensação na turbina, durante a expansão isentrópica, conforme pode ser visto nas Figuras 61 e 62.

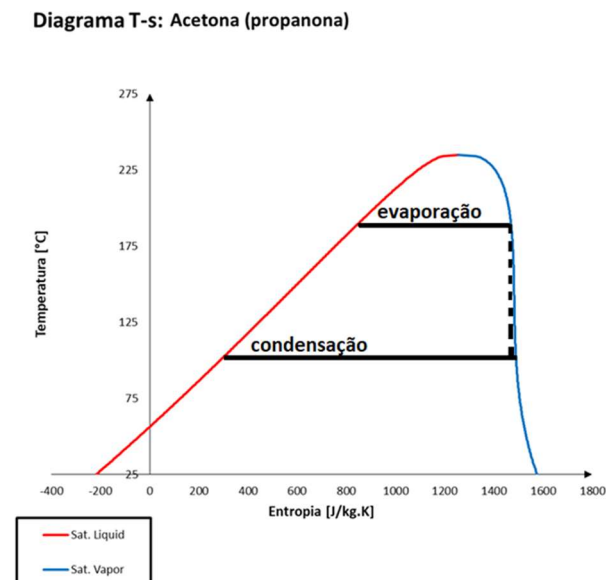
Figura 61 – Diagrama Temperatura-entropia para um fluido “úmido”.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pela análise da Figura 61, percebe-se que, em fluidos com características “úmidas”, a linha que representa a expansão isentrópica está totalmente inserida na região de saturação, fazendo com que haja grande condensação na turbina.

Figura 62 – Diagrama Temperatura-entropia para um fluido isentrópico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Por fim, percebe-se que, pela Figura 62, para fluidos com características isentrópicas, a linha que representa a expansão isentrópica pode estar parcialmente inserida na região de saturação, fazendo com que haja riscos de condensação na turbina.

APÊNDICE C – PARÂMETROS UTILIZADOS PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS

Algumas das equações necessárias ao método MCT (*Module Costing Technique*), utilizado para estimativa dos custos para aquisição e implantação de um ORC, requerem a utilização de valores tabelados, seja para definição de materiais construtivos ou para adequação a diferentes faixas de pressão. Os principais coeficientes utilizados foram escolhidos em função das premissas já citadas ao longo do trabalho, e foram baseados em Turton *et al.* (2018).

A Tabela 17 mostra os valores dos coeficientes K_1 , K_2 e K_3 utilizados para cada um dos equipamentos do ciclo, para aplicação na Equação 3.13. Para determinação dos valores, foram assumidos trocadores de calor de casco e tubo fixos (economizador, evaporador, resfriador e condensador), bomba centrífuga e turbina axial a gás.

Tabela 17 – Parâmetros K_1 , K_2 e K_3 adotados para os equipamentos do ciclo.

Valores dos Parâmetros			
Equipamento	K_1	K_2	K_3
Economizador/ Evaporador	4,3247	-0,303	0,1634
Resfriador/ Condensador	4,3247	-0,303	0,1634
Bomba	3,3892	0,0536	0,1538
Turbina	2,7051	1,4398	-0,1776

Fonte: Adaptado de Turton *et al.* (2018).

Para a Equação 3.14, foram necessários valores o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) de cada um dos trocadores de calor do ciclo (economizador, evaporador, resfriador e condensador). Os valores adotados aparecem na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores adotados para o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U).

(continua)

Equipamento	Fluidos	Valor de U [W/m ² .K]
Economizador	Fluido orgânico (líquido comprimido) / Gases quentes	40

Tabela 18 – Valores adotados para o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U).

(conclusão)

Equipamento	Fluidos	Valor de U [W/m².K]
Evaporador	Fluido orgânico (líquido – vapor) / Gases quentes	40
Resfriador	Fluido orgânico (superaquecido)/ Água de resfriamento	60
Condensador	Fluido orgânico (líquido – vapor) / Água de resfriamento	900

Fonte: Adaptado de UUSITALO *et al.*, 2014; SINNOT, 2005.

Já a Equação 3.17 utiliza-se dos parâmetros B_1 , B_2 e F_M para calcular o fator de correção para as condições reais de operação (F_{BM}). Os valores desses parâmetros foram baseados em Turton *et al.* (2018) e podem ser vistos na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros B_1 , B_2 e F_M adotados para os equipamentos do ciclo.

Equipamento	Valores dos Parâmetros		
	B_1	B_2	F_M
Economizador/ Evaporador	1,63	1,66	1,38
Resfriador/ Condensador	1,63	1,66	1,38
Bomba	1,89	1,35	2,3

Fonte: Adaptado de Turton *et al.* (2018).

Nota-se que a Tabela 19 não inclui os parâmetros para a turbina. Isso se deve ao fato de que, para turbinas, existe uma tabela específica para F_{BM} . No caso, para turbina radial a gás, o valor de F_{BM} adotado foi de 6,2, baseado também em Turton *et al.* (2018).

O último fator necessário para cálculo de F_{BM} é o fator de pressão (F_P), que por sua vez é calculado pela equação 3.18. Os parâmetros C_1 , C_2 e C_3 , necessários para cálculo de F_P , aparecem na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros C_1 , C_2 e C_3 adotados para os equipamentos do ciclo.

Valores dos Parâmetros			
Equipamento	C_1	C_2	C_3
Economizador/ Evaporador	0,03881	-0,11272	0,08183
Resfriador/ Condensador	0	0	0
Bomba	-0,3935	0,3957	-0,0026
Turbina	0	0	0

Fonte: Adaptado de Turton *et al.* (2018).