COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

APLICAÇÃO DE CICLOS RANKINE ORGÂNICOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CALOR DE PROCESSO INDUSTRIAL NO BRASIL

Raphael Guimarães Duarte Pinto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro
Março de 2018

APLICAÇÃO DE CICLOS RANKINE ORGÂNICOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CALOR DE PROCESSO INDUSTRIAL NO BRASIL

Raphael Guimarães Duarte Pinto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. Roberto Schaeffer, PhD.

Prof. David Castelo Branco, DSc.

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes, PhD.

Dr. Maurício Francisco Henriques Jr., D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2018

Pinto, Raphael Guimarães Duarte

Aplicação De Ciclos Rankine Orgânicos para Geração de Eletricidade a Partir De Calor De Processo Industrial no Brasil / Raphael Guimarães Duarte Pinto – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2018.

XXI, 354 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 230-241.

1. Recuperação de Calor. 2. Planejamento Energético. 3. ORC. 4. Economia Industrial. 5. Análise Exergética. I. Szklo, Alexandre Salem. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Alexandre Szklo, por toda a ajuda na elaboração do estudo, suas instruções foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho aqui descrito. Seu amplo conhecimento sobre os temas analisados na tese, desde os detalhes da caracterização econômica da indústria nacional até os conceitos exergéticos mais complexos, pavimentou o caminho para toda a pesquisa realizada.

Ressalto também meu agradecimento ao Marcelo Marinho, por acreditar na tecnologia e em seu potencial no Brasil, abrindo portas para o processo de coleta de informações e para a apresentação da solução ORC aos *players* industriais, fatores que contribuíram muito para a qualidade do estudo.

Aos meus pais, Élcio e Teresinha, e à minha irmã Raquell, pelo constante incentivo.

Ao meu padrinho, Luiz, por me mostrar o caminho das ciências desde o primeiro momento em que demonstrei interesse pelo tema.

À minha esposa, Bárbara, pelo apoio, paciência e carinho ao longo desses anos de trabalho intenso.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

APLICAÇÃO DE CICLOS RANKINE ORGÂNICOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE CALOR DE PROCESSO INDUSTRIAL NO BRASIL

Raphael Guimarães Duarte Pinto

Março / 2018

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A conversão de calor de processos industriais em eletricidade através de Ciclos Rankine Orgânicos (*Organic Rankine Cycle – ORC*) é uma solução de recuperação de calor em baixas temperaturas para produção de eletricidade na indústria. Diante do porte e diversidade do parque industrial brasileiro, a adoção de ORCs poderia aumentar a eficiência energética de 1ª e 2ª Lei deste. Nesse estudo, foram analisados seis subsetores industriais (Cimento, Ferro-Gusa e Aço, Química, Alumínio, Vidros e Cerâmica), de acordo com suas características de processos produtivos, tamanho da produção no Brasil e histórico de aplicações internacionais. Para cada um, realizou-se estudo de caso com uma planta real, destacando-se os resultados de balanço de energia e exergia (irreversibilidades de processo) e análise técnico-econômica das opções. Outrossim, foram calculados os custos marginais de abatimento de emissões de gases de efeito estufa, que indicaram valores predominantemente negativos, isto é, os projetos seriam uma medida de baixo carbono economicamente viável. A extrapolação dos estudos para cada setor indicou um potencial total de 490 MW e a redução de emissões calculada foi de 335 mil toneladas CO_2 anuais. Entretanto, a presença de barreiras de mercado ainda dificulta a difusão da tecnologia em território brasileiro, demandando, portanto, um conjunto de políticas proposto neste estudo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

APPLICATION OF ORGANIC RANKINE CYCLES FOR ELECTRICITY GENERATION FROM INDUSTRIAL PROCESS HEAT IN BRAZIL

Raphael Guimarães Duarte Pinto
March / 2018

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

The conversion of heat from industrial processes into electricity using Organic Rankine Cycles (ORC) is a low temperature heat recovery solution for the production of electricity in industry. Considering the size and diversity of the Brazilian industrial sector, the adoption of ORCs could increase its 1st and 2nd law energy efficiency. In this study, six industrial subsectors were analyzed (Cement, Steelmaking, Chemistry, Aluminum, Glass and Ceramics), according to each production processes characteristics, Brazilian production size and international background. For each sector, a case study was carried out with a real plant, highlighting the results of energy and exergy (process irreversibilities) balances and technical-economic analysis of the projects. Also, the marginal abatement costs were calculated, indicating a majority of negative values, meaning that the projects would be an economically viable low-carbon option. The extrapolation of the studies for each sector indicated a potential of 490 MW and a total emission reduction of 335 thousand tonnes of CO_2 per year. However, the presence of market barriers still hampers the diffusion of technology in Brazilian territory, thus requiring a set of policies proposed in this study.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....1

CAPÍTULO 1 – ESTADO DA ARTE 7

1.1 – Introdução aos Ciclos Rankine Orgânicos (ORCs).....7

1.2 – Aplicações Típicas de ORCs.....17
1.2.1 – Recuperação de Calor de Processos 18
1.2.2 – Fechamento de Ciclos de Potência 20
1.2.3 – Biomassa 24
1.2.4 – Sistemas Termosolares 27
1.2.5 – Sistemas Geotérmicos 30

1.3 – Cenário Atual das Aplicações 34

1.4 – Seleção dos Fluidos de Trabalho 38

1.5 – Viabilidade Econômica de ORCs 43

1.6 – Análise Exergética 49

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA 55

2.1 – Introdução 55

2.2 – Ciclo de Potência 58

2.3 – Análise via Primeira Lei da Termodinâmica 59

2.4 – Análise via Segunda Lei da Termodinâmica 63

2.5 – Análise Econômica de ORCs.....66

CAPÍTULO 3 – A RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL PARA PRODUÇAO DE ELETRICIDADE NA INDÚSTRIA E AS CARACTERÍSTICAS DO SETOR INDUSTRIAL BRASILEIRO 69

3.1 – Introdução 69

3.2 – Química.....76
3.2.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Química Brasileira 76

3.2.2 – Recuperação de Calor na Indústria Química 79

3.3 – Cimento 82
3.3.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Cimento Brasileira 83
3.3.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Cimento 87

3.4 – Ferro-Gusa e Aço 90
3.4.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Ferro-Gusa e Aço Brasileira 91
3.4.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Ferro e Aço 97

3.5 – Vidros 100
3.5.1 – Caracterização da Indústria de Vidro Brasileira 102
3.5.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Vidro 102

3.6 – Alumínio 104
3.6.1 – Caracterização da Indústria de Alumínio Brasileira 106
3.6.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Alumínio 108

3.7 – Cerâmica 110
3.7.1 – Caracterização da Indústria Cerâmica Brasileira 111
3.7.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Cerâmica 114

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO: ESTUDOS DE CASO DE RECUPERAÇÃO DE CALOR NA INDÚSTRIA BRASILEIRA 116

4.1 – Introdução 116

4.2 – Estudo de Caso: Química 120
4.2.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 120
4.2.2 – Sistema Proposto 121
4.2.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC 123
4.2.4 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 128

4.3 – Estudo de Caso: Cimento 134
4.3.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 134
4.3.2 – Sistema Proposto 137
4.3.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC 137
4.3.4 Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 140

4.4 – Estudo de Caso: Ferro Gusa e Aço 144
4.4.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 144
4.4.2 – Sistema Proposto 149
4.4.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC 151

4.4.4 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 153

4.5 – Estudo de Caso: Alumínio 157
4.5.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 157
4.5.2 – Sistema Proposto 160
4.5.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC 162
4.5.4 Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 164

4.6 – Estudo de Caso: Vidros 168
4.6.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 169
4.6.2 – Análise Exergética do Ciclo ORC 171
4.6.3 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 173

4.7 – Estudo de Caso: Cerâmica 177
4.7.1 – Locais passíveis de recuperação de calor 178
4.7.2 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica 183
4.7.3 – Análise Exergética – Caso A 189

4.8 – Resumo dos Resultados dos Estudos de Caso 191
4.8.1 – Resultados da Modelagem Financeira 191
4.8.2 – Resultados da Modelagem Exergética 195
4.8.3 – Impacto do Preço da Eletricidade 199

CAPÍTULO 5 – O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE CALOR UTILIZANDO ORCS NA INDÚSTRIA BRASILEIRA 201

5.1 – Introdução 201

5.2 – Cálculo do Potencial de Geração 203

5.3 – Estimativa do Custo de Instalação 209

5.4 – Barreiras relevantes para a penetração de ORCs no Brasil 210

5.5 – Incentivos para a Penetração de ORCs no Brasil 213
5.5.1 – O Efeito das Condições de Crédito na Viabilidade dos Projetos de Recuperação de Calor Residual 217

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES 222

REFERÊNCIAS 230

APÊNDICE I – EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE ORC 242

APÊNDICE II – RESULTADOS DAS ANÁLISES FINANCEIRAS 245

II.1 Química – Pessimista 245

II.2 Química – Otimista 246

II.3 Cimento – Otimista 247

II.4 Cimento – Pessimista 248

II.5 Siderurgia – Otimista 249

II.6 Siderurgia – Pessimista 250

II.7 Alumínio – Otimista 251

II.8 Alumínio – Pessimista 252

II.9 Vidros – Otimista 253

II.10 Vidros – Pessimista 254

II.11 Cerâmica – Otimista Caso B 255

II.12 Cerâmica – Pessimista – Caso B 256

APÊNDICE III – RESULTADOS DAS ANÁLISES EXERGÉTICAS 257

III.1 – Química 257
- III.1.1 – Ciclopentano 257
- III.1.2 – R123 260
- III.1.3 – Pentano 263
- III.1.4 – R245fa 266

III.2 – Cimento 269
- III.2.1 – Ciclopentano 269
- III.2.2 – R123 272
- III.2.3 – Pentano 275
- III.2.4 – R245fa 278

III.3 – Alumínio 281
- III.3.1 – Ciclopentano 281

III.3.2 – R123 284
III.3.3 – Pentano 287
III.3.4 – R245fa 290

III.4 – Siderurgia 293
III.4.1 – Ciclopentano 293
III.4.2 – R123 296
III.4.3 – Pentano 299
III.4.4 – R245fa 302

III.5 – Vidros 305
III.5.1 – Ciclopentano 305
III.5.2 – R123 308
III.5.3 – Pentano 311
III.5.4 – R245fa 313

III.6 – Cerâmica – Caso A 316
III.6.1 – Ciclopentano 316
III.6.2 – R123 319
III.6.3 – Pentano 322
III.6.4 – R245fa 325

APÊNDICE IV – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – PREÇO DA ELETRICIDADE E CUSTO DE INVESTIMENTO 328

IV.1 – Química 328

IV.2 – Cimento 329

IV.3 – Alumínio 330

IV.4 – Siderurgia 331

IV.5 – Vidros 332

IV.6 – Cerâmica – Caso A 333

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A entalpia de evaporação de fluidos orgânicos. 11
Figura 2 - Ciclo Rankine Típico 11
Figura 3 - Comparação do diagrama T-s de diferentes fluidos orgânicos. 12
Figura 4 – Desempenho de ORCs em Cargas Parciais. 13
Figura 5 - Características positivas de um ORC. 15
Figura 6 - Comparação entre a água e o fluido orgânico. 15
Figura 7 – Comparação da eficiência isentrópica na expansão de unidades a Vapor. 16
Figura 8 - Eficiência termodinâmica de ciclos Rankine a vapor com sistemas ORC. Fonte: (TURBODEN, 2013). 17
Figura 9 - Unidade ORC em uma fábrica de cimento no Marrocos. 20
Figura 10 – Ganhos típicos de potência pelo uso de ORC na exaustão de motores de combustão interna. 22
Figura 11 - Ganhos de potência pelo uso de ORC na exaustão de Turbinas a Gás. 23
Figura 12 - Turbina Solar Centaur, utilizada para compressão de gás. 24
Figura 13 - Sistema ORC utilizando biomassa como fonte térmica. 25
Figura 14 - Unidade de geração de energia via ORC utilizando Biomassa. Destaque à direita para o sistema de distribuição de calor (água quente) distrital. 26
Figura 15 - Configuração de um sistema termosolar com ORC. 28
Figura 16 - Lentes Fresnel da Unidade ORC termosolar da ENAS. 29
Figura 17 - Imagens do sistema Termosolar híbrido instalado na fábrica de cimento. 29
Figura 18 - Produção de eletricidade em fontes geotérmicas utilizando ORCs. Fonte: (ORMAT, 2015) .. 31
Figura 19 – Exemplos de Projetos ORC Geotérmicos, suas temperaturas e vazões da fonte de calor. 32
Figura 20 - Unidade Geotérmica de Puma. 33
Figura 21 - Unidades Geradoras ORC de Galena 3. 34
Figura 22 - Aplicações de ORC no mundo. 34
Figura 23 – Distribuição de Mercado de ORCS (janeiro de 2016). 35
Figura 24 – Distribuição da Potência instalada de ORC por país. 36
Figura 25 - Aplicações de ORCs em recuperação de calor. 37
Figura 26 - Tipos de fluidos de trabalho para ORCs em Função da temperatura da Fonte Quente. 43
Figura 27 – Custo específico do módulo (símbolos sem preenchimento) e total (símbolos com preenchimento) de sistemas ORC em função da potência instalada. 44
Figura 28 – Custos de Instalação apresentados pela Turboden. 45
Figura 29 – Distribuição de custos nas aplicações de recuperação de calor residual. 46
Figura 30 – Trocas de exergia em diferentes estados do sistema. 51
Figura 31 – Esquema de uma máquina térmica reversível. 51
Figura 32 - Comparação entre Energia e Exergia em pontos específicos de uma siderúrgica. 53
Figura 33 – Fluxograma explicativo da metodologia do estudo. 57

Figura 34 - Ciclo ORC e a Denominação dos estados termodinâmicos para a modelagem matemática.... 58
Figura 35 – Composição típica dos custos de instalação dos sistemas ORC. ... 68
Figura 36 - Fluxograma Sankey dos processos de recuperação de calor. ... 70
Figura 37 – Diagrama de decisão para sistemas de recuperação de calor industrial. ... 71
Figura 38 – Distribuição do Consumo de Energia no Setor de Química. ... 77
Figura 39 - Distribuição das indústrias químicas no Brasil. ... 78
Figura 40 - Fator de Utilização da Indústria Química no Brasil. ... 79
Figura 41 – Esquemático da produção de Eteno. ... 81
Figura 42 - Esquema da produção de Cimento. ... 82
Figura 43 - Produção histórica de Cimento no Brasil. ... 83
Figura 44 – Uso de combustíveis na Indústria de Cimento Brasileira. ... 84
Figura 45 - Variação das rotas de produção de cimento no Brasil ao longo dos anos. ... 84
Figura 46 - Evolução da Fração de Clínquer no Cimento. ... 85
Figura 47 - Consumo específico [MJ/tonelada de clínquer de energia térmica no setor de cimento Brasileiro. ... 86
Figura 48 - Recuperação de calor para produção de eletricidade em uma unidade produtora de cimento. 88
Figura 49 - Etapas da produção de aço e ferro. ... 90
Figura 50 - Esquema da produção de Aço. ... 91
Figura 51 – Utilização da Capacidade da Indústria Siderúrgica Brasileira ... 93
Figura 52 – Variação do Consumo de Energia do Setor de Ferro e Aço Brasileiro ... 95
Figura 53 – Estrutura de Consumo do Setor de Ferro e Aço Brasileiro ... 96
Figura 54 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC num forno de Aquecimento de Tarugo. ... 98
Figura 55 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC num forno de Arco Elétrico. ... 99
Figura 56 – Processo de Produção de Vidro. ... 101
Figura 57 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC em forno de fusão de Vidros. ... 103
Figura 58: Cadeia de produção do alumínio ... 105
Figura 59: Produção de alumínio primário no Brasil (2004-2016) ... 106
Figura 60: Localização da cadeia produtiva de alumínio no Brasil ... 107
Figura 61 – Pontos de disponibilidade e demanda de energia térmica na produção de alumínio, mapeados por (NOWICKI e GOSSELIN, 2012). ... 110
Figura 62 – Perdas de Energia num forno túnel da indústria de cerâmica. ... 114
Figura 63 - Configuração do Sistema ORC Proposto para o Estudo de Caso ... 122
Figura 64 - Exemplo de Trocador de Calor para aquecimento do óleo térmico que será direcionado ao sistema ORC. ... 122
Figura 65 - Fluxo de Caixa Acumulado (US$) durante 20 anos ... 133
Figura 66 - Vista aérea da fábrica de cimento estudada. ... 134
Figura 67 - Fluxograma das fontes de calor analisadas. ... 135
Figura 68 - Sistema proposto para recuperação de calor no Estudo de Caso do setor de Cimento. ... 137
Figura 69 - Fluxo de Caixa Acumulado (US$) durante 20 anos ... 143
Figura 70 - Recuperação de calor em um forno de arco elétrico. ... 146

Figura 71 - Fluxograma do Sistema EAF Analisado. 147
Figura 72 - Fluxograma da recuperação de calor no EAF. 150
Figura 73 – Resultados para o Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Siderurgia). 156
Figura 74 - Forno de Reciclagem (esquerda) e Forno Sidewell (direita). 158
Figura 75 - Fluxograma da recuperação de calor na reciclagem de alumínio 161
Figura 76 - Resultados para o fluxo de caixa – US$ (Alumínio). 167
Figura 77 - Vista aérea da Fábrica de Vidro visitada 168
Figura 78 – Processo de produção de vidro na fábrica analisada. 169
Figura 79 - Configuração do Sistema Proposto. 170
Figura 80 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ - Vidros 176
Figura 81 - Vista aérea da fábrica analisada (cerâmica). 177
Figura 82 - Fluxograma de Processo para produção de eletricidade na indústria cerâmica. 178
Figura 83 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Cerâmica A) 185
Figura 84 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Cerâmica) 188
Figura 85 – Tempo de Payback e Taxa Interna de Retorno obtida para os Estudos de Caso analisados 192
Figura 86 - Histórico do Fator de Emissão do SIN 194
Figura 87 - Emissões evitadas (tCO_2) ao ano e o Custo de Abatimento (USD/tCO2) para os Estudos de Caso 195
Figura 88 – Comparação da Destruição Exergética nos estudos de Caso. 197
Figura 89 - Comparação do percentual de cada elemento do ciclo na destruição exergética. 198
Figura 90 - Resultado para as taxas internas de retorno em função do preço da eletricidade. 199
Figura 91 - Esquema explicativo da extrapolação para o cálculo do potencial de ORCs na Indústria brasileira. 202
Figura 92 - Participação dos Setores analisados no potencial Brasileira de recuperação de calor residual. 207
Figura 93 - Esquema dos incentivos sugeridos para incentivar o potencial de ORCs no Brasil 216
Figura 94 - Taxas de Retorno calculadas pára cada setor 218
Figura 95 - Unidade ORC na próxima à laminação. 242
Figura 96 - Unidade ORC Instalado na Fábrica. 243
Figura 97 – Vista Aérea da Fábrica. 244

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações De Sistemas Orc Para Recuperação De Calor Em 1982. 9
Tabela 2 - Lista De Alguns Fabricantes Atuais De Orcs E As Características De Seus Produtos Em 1982. 9
Tabela 3 - Características Gerais Das Aplicações De Orcs. 18
Tabela 4 - Temperaturas Médias Da Exaustão De Unidades Geradoras. 22
Tabela 5 – Lista De Fabricantes De Orcs 35
Tabela 6 - Comparação Da Eficiência Isentrópica Das Turbinas Utilizando Como Fluido De Trabalho/Vapor (Baixo Peso Molecular) E Um Fluido De Trabalho De Alto Peso Molecular. 40
Tabela 7 - Temperatura Máxima De Estabilidade De Alguns Fluidos De Trabalho 41
Tabela 8 - Classificação Ashrae Para Toxidade E Flamabilidade 41
Tabela 9 – Comparações De Capex E Opex De Orc E Ciclos Vapor. 46
Tabela 10 – Parâmetros De Entrada Para O Estudo De Caso 48
Tabela 11 – Comparativo Dos Resultados Da Análise De Viabilidade. 49
Tabela 12 – Exemplos De Fontes Quentes Para Recuperação De Calor Em Processos Industriais E Suas Qualidades 72
Tabela 13 - Exemplos De Fontes De Calor Com Alta Temperatura 73
Tabela 14 - Exemplos De Fontes De Calor Com Média Temperatura 73
Tabela 15 - Exemplos De Fontes De Calor Com Baixa Temperatura 73
Tabela 16 – Lista De Unidades De Recuperação De Calor Industrial Utilizando Orc. 75
Tabela 17 – Uso De Combustíveis Para Produção De Energia Térmica Na Indústria De Cimento Brasileira. 86
Tabela 18 - Estimativa De Geração Via Orc Na Indústria Europeia De Cimento 88
Tabela 19 – Oportunidade De Mercado Para Recuperação De Calor Na Indústria De Cimento. 89
Tabela 20 – Produção Da Siderurgia Mundial E Brasileira De Aço Bruto – Milhões De Toneladas 92
Tabela 21 – Produção Independente De Ferro-Gusa No Brasil 94
Tabela 22 – Consumo Energético Da Indústria De Ferro E Aço Brasileira (Tep) 96
Tabela 23 - Estimativa De Geração [Mw] Via Orc Na Indústria Europeia De Aço 100
Tabela 24 - Estimativa Do Potencial De Geração De Energia Elétrica Em Fábricas De Vidro Plano Na Europa. 104
Tabela 25: Produção, Demandas De Energia Térmica E Elétrica E Consumos Específicos Do Setor Cerâmico Em 2012. 113
Tabela 26 - Resultados De Um Orc Em Forno Para Produção De Cerâmica. 115
Tabela 27 – Taxas Consideradas. 118
Tabela 28 - Dados Das Fontes De Calor 120
Tabela 29 – Composição Química Média Da Fonte Quente. 121
Tabela 30 - Parâmetros De Entrada Para A Simulação Do Ciclo Orc 124
Tabela 31 – Temperatura No Ponto 1 Para Os Diversos Fluidos Analisados 124
Tabela 32 - Limites Inferiores E Superiores Das Variáveis De Controle Da Simulação 125

Tabela 33 – Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho. 125
Tabela 34 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Pentano Como Fluido De Trabalho. 126
Tabela 35 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O R123 Como Fluido De Trabalho. 126
Tabela 36 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O R245fa Como Fluido De Trabalho. 127
Tabela 37 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 127
Tabela 38 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 128
Tabela 39 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 128
Tabela 40 - Catálogo Das Máquinas Estudadas Para Produção De Eletricidade (Turboden, 2013). 129
Tabela 41 - Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 130
Tabela 42 – Custos De Investimento (Química) 130
Tabela 43 - Custos De Operação E Manutenção Do Sistema. 131
Tabela 44 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio. (Química) 132
Tabela 45 - Resumo Dos Resultados Financeiros Do Estudo De Caso (Química) 133
Tabela 46 - Composição Química Da Exaustão Considerada. 135
Tabela 47 - Dados De Projeto Das Condições Termodinâmicas Da Fonte Quente 136
Tabela 48 - Condições Termodinâmicas Da Exaustão Após A Troca De Calor. 136
Tabela 49 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho - Cimento. 138
Tabela 50 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 139
Tabela 51 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 139
Tabela 52 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 139
Tabela 53 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 140
Tabela 54 – Custos De Investimento (Cimento) 141
Tabela 55 - Custos De Operação E Manutenção Do Sistema. 141
Tabela 56 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio. (Cimento) 142
Tabela 57 - Resumo Dos Resultados Financeiros Do Estudo De Caso (Cimento) 143
Tabela 58 - Composição Química Considerada Na Exaustão Do Forno De Reaquecimento De Tarugo. 144
Tabela 59 - Dados De Projeto Das Condições Termodinâmicas Da Fonte Quente (Reaquecimento De Tarugo). 145
Tabela 60 - Condições Termodinâmicas Da Exaustão Após A Troca De Calor. 145
Tabela 61 – Informações Operacionais De Projeto Do Eaf Analisado. 147
Tabela 62 – Dados Da Exaustão Após A Troca De Calor. 148
Tabela 63 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho – Siderurgia. 151

Tabela 64 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 152
Tabela 65 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 152
Tabela 66 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 152
Tabela 67 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 153
Tabela 68 – Estimativa Do Capex. 154
Tabela 69 - Estimativas Do Opex 154
Tabela 70 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio (Siderurgia) 155
Tabela 71 – Resumo Do Caso De Estudo (Siderurgia) 156
Tabela 72 - Condições Termodinâmicas Das Fontes De Calor Selecionadas Para Análise. 158
Tabela 73 - Composição Química Dos Fornos Considerada 159
Tabela 74 – Condições Termodinâmicas Dos Gases De Exaustão Após A Troca De Calor 159
Tabela 75 – Potência Térmica Disponível Calculada [Kw] 160
Tabela 76 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho - Alumínio. 162
Tabela 77 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 162
Tabela 78 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 163
Tabela 79 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 163
Tabela 80 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 164
Tabela 81 – Estimativa Do Capex. 164
Tabela 82 - Estimativas Do Opex 165
Tabela 83 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio (Alumínio) 166
Tabela 84 – Resumo Do Caso De Estudo (Alumínio) 167
Tabela 85 – Dados De Operação Das Linhas De Produção 169
Tabela 86 - Composição Química Da Exaustão Dos Fornos De Vidro 170
Tabela 87 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho - Vidros. 171
Tabela 88 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 171
Tabela 89 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 172
Tabela 90 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 172
Tabela 91 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 173
Tabela 92 - Estimativa Dos Custos De Investimento. 173
Tabela 93 - Custos Operacionais Estimados. 174
Tabela 94 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio (Vidros). 175
Tabela 95 - Resumo Do Caso De Estudo (Vidros) 176
Tabela 96 – Dados De Operação Das Linhas De Produção 179
Tabela 97 - Composição Química Da Exaustão Dos Fornos De Cerâmica 179
Tabela 98 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para O Modulo Orc (Recup. De Calor Pura). 180
Tabela 99 - Variação Do Pci Do Eucalipto Em Função Da Umidade. 181

Tabela 100 - Características Do Processo De Queima Da Biomassa Consideradas. 181
Tabela 101 – Resultado Da Potência Elétrica Estimada Para Modulo Orc. 182
Tabela 102 - Estimativa Dos Custos De Investimento – Cerâmica A. 183
Tabela 103 - Custos Operacionais Estimados – Cerâmica A. 183
Tabela 104 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio (Cerâmica A) 184
Tabela 105 – Resumo Do Caso De Estudo (Cerâmica A) 185
Tabela 106 - Estimativa Dos Custos De Investimento – Cerâmica B. 186
Tabela 107 - Custos Operacionais Estimados – Cerâmica B. 186
Tabela 108 - Dados Financeiros Dos Primeiros Dez Anos Do Empreendimento – Caso Médio (Cerâmica B) 187
Tabela 109 – Resumo Do Caso De Estudo (Cerâmica B) 188
Tabela 110 - Resultados Da Eficiência Exergética Interna [%] Utilizando O Ciclopentano Como Fluido De Trabalho - Alumínio. 189
Tabela 111 – Resumo Dos Resultados Para Os Pontos Ótimos Obtidos 189
Tabela 112 – Destruição Exergética [Kw] Nos Pontos Ótimos Obtidos 190
Tabela 113 – Resultados De Potência E Eficiência Termodinâmica 190
Tabela 114 – Resumo Dos Resultados Obtidos Para Os Estudos De Caso Considerando As Premissas Do Modelo “Médio”. 193
Tabela 115 – Resumo Dos Resultados Termodinâmicos Dos Estudos De Caso. 196
Tabela 116 - Dados De Produção Dos Setores Da Indústria Analisados 203
Tabela 117 - Potencial Específico De Geração Via Orc 205
Tabela 118 – Potencial Específico De Geração Via Orc Para Siderurgia 206
Tabela 119 – Resultados Dos Potenciais De Produção De Eletricidade Através De Calor De Rejeito Da Indústria Brasileira. 206
Tabela 120 - Emissões De Gaes De Efeito Estufa Na Indústria Brasileira - Ano 2010 – Mil Toneladas. 208
Tabela 121 - Potencial De Abatimento De Co2 208
Tabela 122 – Determinação Do Custo Estimado De Investimento. 209
Tabela 123 - Resultados Financeiros Dos Estudos De Caso Analisados - Cenários Otimista, Médio E Pessimista 217
Tabela 124 – Resultados Obtidos Para O Estudo De Caso Na Indústria De Alumínio Considerando Incentivos Financeiros 219
Tabela 125 - Resultados Obtidos Para O Estudo De Caso Na Indústria De Cerâmica Considerando Incentivos Financeiros 220
Tabela 126 - Resultados Obtidos Para O Estudo De Caso Na Indústria De Cimento Considerando Incentivos Financeiros 221
Tabela 127 – Resultados Obtidos Nos Estudos De Caso. 225
Tabela 128 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Química 328
Tabela 129 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Química 328
Tabela 130 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Cimento 329

Tabela 131 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Cimento 329
Tabela 132 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Alumínio 330
Tabela 133 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Alumínio 330
Tabela 134 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Siderurgia 331
Tabela 135 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Siderurgia 331
Tabela 136 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Vidros 332
Tabela 137 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Vidros 332
Tabela 138 - Resultados Análise De Sensibilidade - Tir Cerâmica Caso A 333
Tabela 139 - Resultados Análise De Sensibilidade - Payback Cerâmica Caso A 333

GLOSSÁRIO

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim)
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Capital Expenditure (Custos de Investimento)
CFCs	Clorofluorcarbonos
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COP 21	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015
CTCN	Climate Technology Centre and Network
EAF	Electric Arc Furnace (Forno a Arco Elétrico)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FINEM	Financiamento a Empreendimentos
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
GCF	Green Climate Fund
GEF	Global Environment Facility
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential

HCFC	Hidroclorofluorcarbono
HFE	Hidrofluoreteres
HREII	Heat Recovery in Energy Intensive Industries
IAB	Instituto Aço Brasil
MWe	Megawatt elétrico
MWth	Megawatt térmico
NDC	Nationally Determined Contributions
NEEAP	National Energy Effciency Action Plans
ORC	Organic Rankine Cycle – Ciclo Rankine Orgânico
ODP	Ozone Depletion Potential
OPEX	Operational Expenditure (Custos de Operação)
O&M	Operação e Manutenção
PCI	Poder Calorífico Inferior
PFC	Perfluorcarbono
SIN	Sistema Integrado Nacional
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
SW	Fornos tipo Sidewell
TIR	Taxa Interna de Retorno
WHR	Waste Heat Recovery
WHTP	Waste Heat to Power

INTRODUÇÃO

A combinação de fatores como o aumento do consumo de energia final, a pressão das sociedades em relação às externalidades socioambientais dos sistemas energéticos e a necessidade de uma menor dependência por combustíveis fósseis justificam a busca por opções avançadas e inovadoras de conversão de energia, assim como a utilização mais eficiente da energia final.

Os combustíveis fósseis são responsáveis por cerca de 65% da produção de energia elétrica no mundo, alcançando 80% (WORLD BANK, 2017) da demanda energética total do mundo (incluído calor, transporte, geração de eletricidade e outros usos). O aumento da demanda, e consequentemente maior uso dos combustíveis provenientes de fontes não renováveis de energia têm por efeito o crescimento do impacto ambiental causado pelo uso desses combustíveis.

Devido ao desenvolvimento e melhora das tecnologias capazes de utilizar calor residual de processos industriais durante as duas últimas décadas, a conversão de calor de baixa temperatura em eletricidade pode se mostrar com uma solução promissora para o aumento da eficiência energética do setor industrial, promovendo a geração de eletricidade distribuída.

Com um aumento de sua aplicação ao longo dos últimos 10 anos, a tecnologia de Ciclos Rankine Orgânicos (Organic Rankine Cycle – ORC) tem se mostrado como uma solução confiável e econômica para a recuperação de calor em baixas temperaturas (ORC World Maps, 2016).

A tecnologia de ORCs consiste em uma derivação dos ciclos Rankine tradicionais, onde o fluido de trabalho (água) é substituído por uma substância orgânica com baixa temperatura de evaporação, dentre outras características especiais.

A seleção do fluido de trabalho dos ORCs envolve uma complexa análise, sendo um dos pontos fundamentais no desenvolvimento da tecnologia (QUOLIN, *et al.* 2012); (DRESCHER e BRUGGEMANN, 2007). De acordo com WANG e ZHAO (2008), o fluido de trabalho deve satisfazer os seguintes critérios básicos: estabilidade química, não gerar deposição de material e não ser corrosivo. Além disso, o fluido deve possuir alta

massa molecular, baixa temperatura e entalpia de evaporação, permitindo sua aplicação em situações onde a fonte de calor também esteja em baixas temperaturas. Um estudo realizado por MAGO, *et al.* (2007), mostrou que fluidos "secos" ou "isentrópicos" podem atingir desempenhos superiores em sistemas ORC, devido ao fato de não condensarem após a expansão na turbina. O mesmo resultado foi mostrado por DRESCHER e BRUGGEMANN (2007). Logo, a combinação dessas características particulares é fundamental para a otimização da tecnologia de Ciclos Rankine Orgânicos.

Em suma, quando comparado com os sistemas Rankine convencionais (com água), os fluidos utilizados em ORCs possuem massa molecular mais alta, permitindo design mais compacto dos equipamentos, vazões mássicas mais elevadas e maiores eficiências isentrópicas nas turbinas, atingindo 80-85% (DUFFY, 2005). Essas particularidades também têm como consequência a redução da velocidade da turbina, reduzindo o stress mecânico e a erosão no equipamento, resultando em uma maior vida útil da máquina. Além disso, os ORCs operam com baixa perda de eficiência quando em carga parcial (VESCOVO, 2009). No entanto, uma vez que o ciclo trabalha em níveis de temperatura mais baixos, a eficiência global de energia varia entre 15 a 25% (TURBODEN, 2015); (DRESCHER e BRUGGEMANN, 2007), patamares inferiores àqueles atingidos por ciclos Rankine convencionais de grande porte quando operando em condições de temperatura elevadas.

A utilização direta de calor de rejeito na indústria é um paradigma para aumentar a eficiência energética e reduzir os custos e emissões de poluentes (HREII, 2013), que recai na gama de ações de diversas diretivas governamentais, entretanto nem sempre se apresenta como uma solução viável economicamente, devido à falta de demanda de calor nas proximidades ou na própria unidade industrial. Quando nenhuma opção para o uso direto do calor é encontrada, deve-se optar por analisar a viabilidade de sua conversão em eletricidade, uma forma de energia facilmente transportada e com valor agregado mais elevado do que a energia térmica.

Existem diversas estimativas sobre o potencial energético de geração de eletricidade nas indústrias (DOE, 2008), entretanto são estudos teóricos que não analisam a viabilidade econômica dos sistemas de geração. Porém, ao longo das últimas décadas os ORCs têm se destacado como uma solução economicamente viável para a recuperação de calor de rejeito antes desperdiçados na indústria.

No setor de cimento, o uso de ORCs foi avaliado internacionalmente como uma das tecnologias de geração mais econômicas (QUOILIN e LEMORT, 2009), sendo uma referência em destaque como solução de eficiência energética industrial nesse segmento (JRC, 2010). A aplicação nos setores de vidros e ferro-gusa e aço também vêm ganhando destaque, como descrito por DAVID, *et al.*, (2011) e em FOUDRYBENCH PROJECT (2011).

Apesar do grande potencial da tecnologia, existem barreiras significativas para sua maior penetração no mercado, principalmente associadas à falta de conhecimento da aplicação, ausência de políticas governamentais que classifiquem a aplicação fonte de geração limpa e financiamento para alavancar os projetos no país.

Visando sobrepor tais barreiras, a União Europeia, EUA, China e Índia vêm fazendo esforços para popularizar a solução. O projeto Heat recovery in Energy Intensive Industries, (HREII, 2013), realizou, na Europa, o desenvolvimento de um conjunto de ações de apoio aos sistemas de recuperação de calor, partindo da avaliação do potencial de calor de rejeito disponível para geração de eletricidade, envolvendo os principais agentes aos quais a tecnologia possa interessar. Posteriormente, foram verificados os principais entraves, buscando analisar quais ações devem ser tomadas pelos formuladores de políticas públicas para incentivar a penetração da tecnologia, criando assim condições mais favoráveis. Dois resultados significativos foram obtidos devido a esse projeto, atualmente a recuperação de calor foi incluída no NEEAP (National Energy Effciency Action Plans) de 2011, e houve a criação de um incentivo específico, os Certificados Brancos[1].

Nos EUA, estudos para avaliar o potencial de recuperação de calor também vêm sendo desenvolvidos, como a publicação do Departamento de Energia Norte-Americano (DOE, 2008). Na Índia, após a instalação de algumas unidades de recuperação de calor de baixa temperatura utilizando ORCs, um estudo foi realizado pelo Fórum de Energia Indo-Alemão (IGEF), com cooperação do Ministério de Energia Indiano, (IGEF, 2017).

---

[1] Certificado Brancos (White Certificates), também denominados "Títulos para a Eficiência Energética", são certificados emitidos por organismos de certificação independentes que confirmam as declarações dos agentes do mercado relativamente às economias de energia resultantes de medidas de melhoria da eficiência energética (JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA, 2006).

Esse estudo buscou mapear o potencial de mercado indiano para as soluções ORC, indicando barreiras e políticas para a maior penetração da tecnologia no país.

Além disso, na Itália, segundo POLITECNICO DI MILANO (2012), os sistemas de produção de eletricidade via recuperação de calor podem aumentar a competitividade das indústrias de siderurgia, vidros e cimento em 6%, 13% e 14%, respectivamente.

Em 2014, o relatório Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier analysis, citou o Brasil como um mercado relevante para a aplicação da tecnologia, destacando que no país não existiam sistemas de recuperação de calor para geração de eletricidade na indústria de cimento, e indicando um potencial entre 190 a 340 MW para o país (WORLD BANK, 2014).

Exceto para fins acadêmicos, não existe até o momento uma instalação comercial de ORC no Brasil[2]. Isso ocorre mesmo com o país apresentando um mercado promissor, onde o setor industrial possui uma alta razão calor-potência (SZKLO, SOARES e TOLMASQUIM, 2004) (HENRIQUES JR., 2010), com fontes de baixa temperatura em diversos subsetores industriais, tais como cimento (SOARES e TOLMASQUIM, 2000) (IIP, 2014), químico (SZKLO, *et al.*, 2004), cerâmico (SCHOWB, *et al.*, 2009) vidro e outros (HENRIQUES JR., 2010). Ademais, o setor industrial brasileiro representa aproximadamente 30% do consumo de energia final do país e 33% da demanda total de eletricidade (EPE, 2017).

O grande potencial energético disponível em rejeitos de alta exergia na indústria de transformação brasileira deve ser estudado de forma a quantificar o potencial aumento de eficiência e seus impactos, visto que tais impactos podem se mostrar consideravelmente significativos ambiental e economicamente.

Outrossim, outros estudos avaliaram o potencial de ganhos de eficiência na indústria brasileira, como em HENRIQUES JR. (2010), SCHAEFFER e WIRTHSHAFTER (1992) e SCHWOB (2012), porém nenhum desses estudos tratou especificamente da tecnologia de ORCs dentro do contexto da indústria energo-intensiva brasileira. Nem

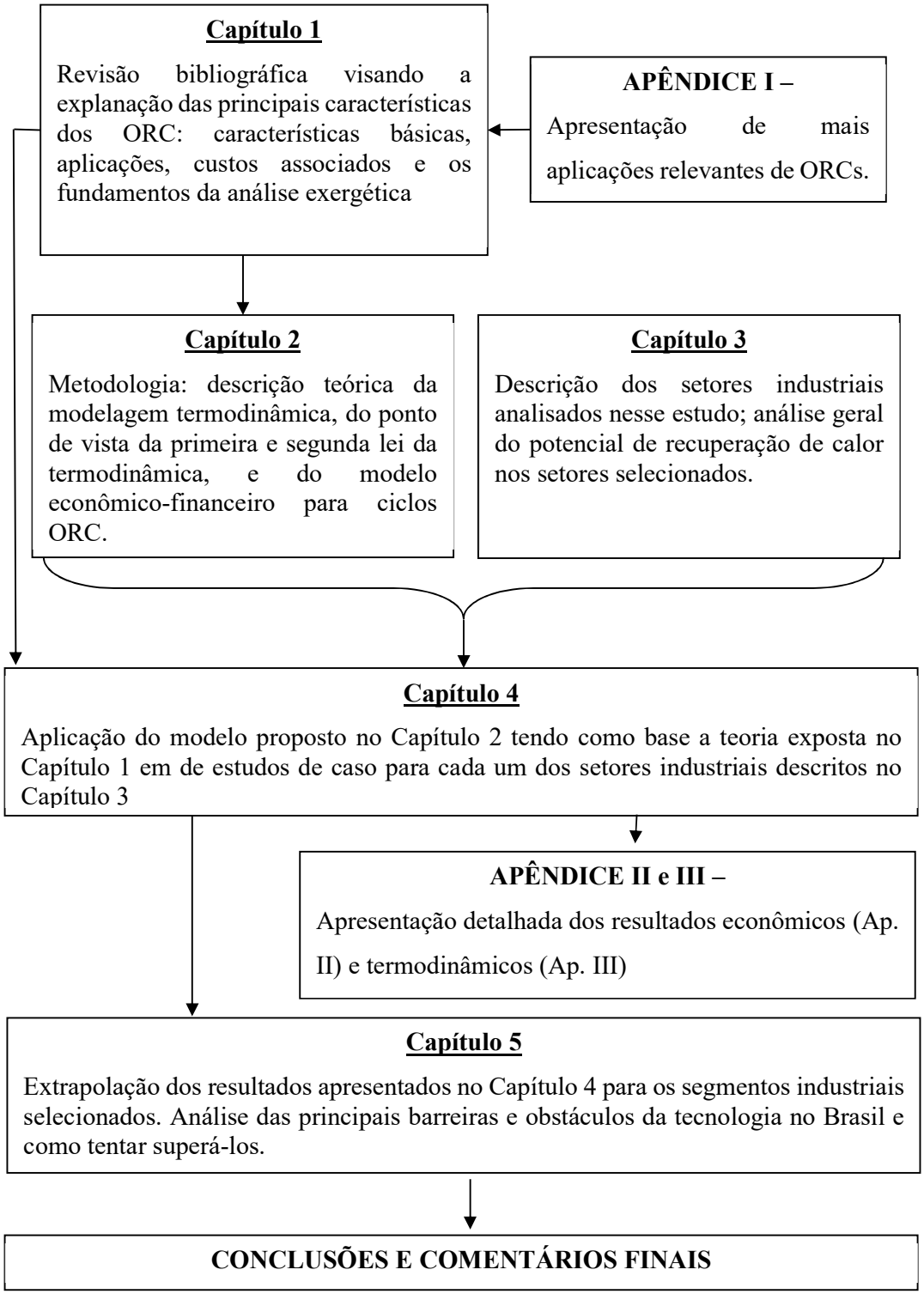
---

[2] Uma unidade de 5 MW foi instalada na Universidade de Itajubá, em 2015 para fins acadêmicos, fazendo uso de concentradores solares para produção de eletricidade.

tampouco se basearam em diagnósticos energéticos de unidades fabris reais, cujos dados de propriedades intensivas e extensivas destas plantas permitiram desenvolver balanços energéticos e exergéticos.

Logo, o objetivo principal do presente estudo é identificar o potencial brasileiro para a recuperação de calor na indústria utilizando ORCs, dando os primeiros passos no caminho de elucidar os benefícios dessa tecnologia para a indústria nacional e identificar os pontos principais onde a elaboração de instrumentos e políticas públicas se fazem necessários para o completo desenvolvimento da aplicação no país, pavimentado assim, o caminho para a estruturação de projetos/estudos nacionais, em consonância com o que vem ocorrendo nos demais países industriais.

O estudo foi estruturado em cinco capítulos distintos, sendo o primeiro uma revisão e contextualização do estado da arte de ciclos Rankine orgânicos, suas diferentes aplicações, caraterísticas técnicas e econômicas e a adequanção de análises de segunda lei para verificação da aplicabilidade dessa tecnologia para o estudo de projetos de recuperação de calor. No Capítulo 2 é apresentada a metodologia utilizada para a análise realizada na tese, equanto no Capítulo 3 é realizada a seleção dos setores industrais estudados na tese, destacando suas principais características e introduzindo os potenciais para a recuperação de calor para produção de eletricidade. Fazendo uso da metodologia e formulação apresentada no Capítulo 2 em conjunto com os setores descritos no Capítulo 3, no Capítulo 4 são descritos os estudos de caso utilizados para análise técnico-econômica, e apresentados seus resultados. Posteriormente, o Capítulo 5 descreve o processo de cálculo do potencial de ORCs para recuperação de calor no Brasil, fazendo uso dos resultados do Capítulo 4 para extrapolação, sendo comentado também as principais barreiras para a tecnologia e os instrumentos necessários para superá-las no país.


Capítulo 1
Revisão bibliográfica visando a explanação das principais características dos ORC: características básicas, aplicações, custos associados e os fundamentos da análise exergética
APÊNDICE I –
Apresentação de mais aplicações relevantes de ORCs.
Capítulo 2
Metodologia: descrição teórica da modelagem termodinâmica, do ponto de vista da primeira e segunda lei da termodinâmica, e do modelo econômico-financeiro para ciclos ORC.
Capítulo 3
Descrição dos setores industriais analisados nesse estudo; análise geral do potencial de recuperação de calor nos setores selecionados.
Capítulo 4
Aplicação do modelo proposto no Capítulo 2 tendo como base a teoria exposta no Capítulo 1 em de estudos de caso para cada um dos setores industriais descritos no Capítulo 3
APÊNDICE II e III –
Apresentação detalhada dos resultados econômicos (Ap. II) e termodinâmicos (Ap. III)
Capítulo 5
Extrapolação dos resultados apresentados no Capítulo 4 para os segmentos industriais selecionados. Análise das principais barreiras e obstáculos da tecnologia no Brasil e como tentar superá-los.
CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

CAPÍTULO 1 – ESTADO DA ARTE

A adoção de ciclos Rankine orgânicos (ORCs) para geração de eletricidade a partir da recuperação de calor industrial é um tema que vem sido discutido na academia desde a década de 1960. Porém, na última década, o uso desses sistemas na recuperação de calor residual em processos industriais se tonou uma realidade e tem sido aplicado em diversos segmentos em todo o mundo.

O objetivo desse capítulo é mostrar o estado da arte da tecnologia ORC, detalhando sua evolução ao longo dos últimos anos, evidenciando suas características termodinâmicas, além de analisar suas aplicações considerando a viabilidade econômica desses sistemas de geração.

1.1 – Introdução aos Ciclos Rankine Orgânicos (ORCs)

Os primeiros sistemas ORC foram desenvolvidos para aplicações espaciais, submarinas e para uso de energia solar em áreas remotas, onde a disponibilidade de energia era considerada um fator mais crítico do que a viabilidade econômica do sistema. Essas unidades eram geralmente pequenas, com potências inferiores a 300 kW (HNAT, *et al.*, 1982). Na década de 1970, quando o custo da energia aumentou de forma significativa, ocorreram incentivos para o desenvolvimento de ORCs para aplicações usando fontes solares e geotérmicas (BARBER, 1979). Em menor grau, sistemas ORC foram desenvolvidos para recuperação de calor industrial (HNAT, *et al.*, 1982).

Em 1973, o artigo de ANGELINO e MORONI (1973) detalhou a possibilidade de utilização de fluidos orgânicos em ciclos de potência (Rankine) para produção de eletricidade como uma alternativa aos ciclos a vapor através de uma análise comparativa. O estudo evidenciou que quando determinados fluidos orgânicos eram utilizados no lugar do vapor, a eficiência do ciclo de potência era superior para casos onde a fonte de calor possuía temperaturas mais baixas.

Conforme anteriormente mencionado, o aumento de interesse em relação ao uso de ORCs para recuperação de calor industrial se intensificou a partir de meados da década

de 1970, quando uma série de artigos apresentando as diversas aplicações dos sistemas ORC foi publicada, podendo-se evidenciar a utilização dos ciclos Rankine orgânicos para recuperação de calor residual industrial de baixa temperatura, como observado por SAWYER e ICHIKAWA (1980), CHEEK e LACEY (1977), GIGLIOLI (1978) e CASCI, *et al.* (1981). Porém, o status da tecnologia naquela época apresentava um conjunto de incertezas sobre sua viabilidade econômica.

No estudo de HNAT, *et al.* (1982), os autores destacam o constante aumento do preço da eletricidade naquele período, mostrando a necessidade de se buscar novas soluções para o aumento de eficiência das instalações industriais. No artigo, são apresentadas configurações de sistemas ORC, comparações de fluidos de trabalho (água, metanol, fluorinol, tolueno, R-11, R-113, entre outros). Além disso, são mostrados estudos de caso em aplicações industriais, utilizando as seguintes fontes de calor:

- Produção de Ácido Sulfúrico líquido
- Condensador de vapor (vapor de baixa pressão);
- Condensador de vapor (vapor de hidrocarbonetos);
- Exaustão de motores Diesel;
- Recuperação de calor na chaminé de uma indústria de vidro.

Finalmente, em HNAT, *et al.* (1982), são apresentados os fabricantes de sistemas ORC operacionais em 1982, bem como o tipo de aplicação associado a cada caso, conforme mostrado na Tabela 1. A partir de então, os produtores de ORCs deram início à otimização dos ciclos orgânicos, enfatizando a seleção de fluidos orgânicos ideais, melhorias nos trocadores de calor, expansores, etc., buscando tornar suas unidades cada vez mais competitivas e ocupar o nicho de mercado deixado pelos sistemas a vapor convencionais. A Tabela 2 mostra uma lista de alguns fabricantes de ORCs atuais e suas características fundamentais.

Como mencionado, a tecnologia dos Ciclos Rankine Orgânicos consiste basicamente, na substituição do fluido de trabalho de um ciclo Rankine convencional (água) por um fluido com uma alta massa molecular, menor temperatura de evaporação e menor calor específico de evaporação, Figura 1. Tais características fazem com que ORCs operem com fontes quentes inferiores a 400-500°C, permitindo sua utilização na recuperação do calor de rejeito em boa parte dos processos industriais.

Tabela 1 - Aplicações de Sistemas ORC para recuperação de calor em 1982.

Fabricante	País	Indústria	Outras Fontes	Tipo de Unidade Geradora	Fluido de Trabalho	Potência [kW]
Aerojet	EUA	Cimento (kiln)	-	Turbina	2-Metilpiridina	3100
API	EUA - Japão	Química (corrente de vapor de ácido sulfúrico e xileno)	-	Turbina	R-133a, R11	560 - 3800
Barber-Nichols	EUA	-	Aquecimento solar ou geotermia	Turbina	R-12, R-113, R-114 e Isobutano	1,5 - 900
Bertin & Cie	França	Motores Diesel	-	Turbina	FC75	50 - 1120
Dornier Systems	Alem. Ocidental	-	Aquecimento Solar	Turbina	R-114	15 - 260
Fiat	Itália	-	Combustor experimental	Turbina	R-11	25
Ford Aerospace & Communications Corp.	EUA	-	Aquecimento Solar	Turbina	Perfluorexano e Tolueno	70
Foster Miller	EUA	Química (Água quente de unidade de difusão)	-	Motor	R-22	1,5 - 155
Garret Corporation	EUA	-	Aquecimento Solar	Turbina	R-11	0,5 - 1,5
General Electric	EUA	-	Aquecimento Solar	Turbina	Freôns	15 - 1000
Hitachi	Japão	Gás de exaustão de chaminés	-	Turbina	Brometo de Lítio	80
Instituto de Macchine	Itália	Cimento (kiln)	-	Turbina	C2Cl4	350
Messerschimitt - Bolkow - Blohw	Alem. Ocidental	-	Geotermia e Aquecimento solar	Expansor helicoidal	Tolueno e R-114	10-100
Mitsui	Japão	Siderurgia (unidade de sinterização)	-	Turbina	Fluorinol-85	500 - 14000
MTI	EUA	Vapores condensante e motores diesel	Motores diesel	Turbina	R-113	20 - 2500
ORMAT	Israel	Nafta líquida, steam	Aquecimento solar	Turbina	R-11	300
Sofretes	França	-	Aquecimento solar	Expansor de parafuso	R-11	5 - 40,0
Sundstrands	EUA	Motores diesel	-	Turbina	Tolueno	500 - 750
Thermal Electron	EUA	-	-	Turbina	Tolueno e R-114, R-11 e R-22	1 - 1125
Toshiba	Japão	-	Motores diesel	Turbina	R-114 e Tolueno	1 - 1000
Turboden	Itália	-	-	Turbina axial	-	5 - 150

Fonte: (HNAT, PATTEN, *ET AL.*, 1982)**.**

Tabela 2 - Lista de alguns fabricantes de ORCs e as características de seus produtos em 1982.

Fabricante	País	Aplicações	Potência [kW]	Temp. Fonte Quente [°C]	Tecnologia
ORMAT	EUA	Geo, WHR, Solar	200 a 70.000	150 a 300	n-pentano e outros fluidos, turbina axial de dois estágios e gerador síncrono
Turboden	Itália	Geo, WHR, Solar e Bio	200 a 15.000	100 a 300	Fluidos: OMTS, Solkatherm. Turbina axial de dois estágios
Adoratec/Maxxtec	Alemanha	Bio	315 a 1600	300	Fluido OMTS
Opcon	Suécia	WHR	350 a 800	< 120	Fluido: Amônia. Turbina Lysholm
GMK	Alemanha	WHR, Geo, Bio	50 a 5000	120 a 350	Turbinas multi estágio axiais de 3000 rpm
Bosch	EUA	WHR	65 a 325	120 a 150	Fluido: R245fa
Turboden PureCycle	EUA	WHR, Geo	280	91 a 149	Fluido: R245fa e turbina radial
GE CleanCycle	EUA	WHR	125	> 121	Fluido: R245fa e turbina radial
Cryostar	França	WHR, Geo	-	100 a 400	Fluido: R134a e R245fa e turbina radial
Tri-o-gen	Holanda	WHR	160	> 350	Fluido tolueno e turbina radial
Electratherm	EUA	WHR, Solar	50	> 93	Fluido R245fa e expansor de parafuso

Fonte: (HNAT, PATTEN, *ET AL.*, 1982)**.**

O fluido orgânico utilizado é confinado em um circuito onde é vaporizado utilizando o calor disponível da fonte quente, posteriormente segue para um dispositivo expansor (turbina) acoplado a um gerador elétrico produzindo potência. Após a expansão o fluido é condensado, utilizando água ou ar ambiente. O condensado é, então, bombeado e enviado novamente ao evaporador finalizando o ciclo termodinâmico, conforme a Figura 2. A utilização de um regenerador, que recupera parte do calor da saída do expansor para pré-aquecer o fluido orgânico antes da evaporação, também pode ser adotada para aumentar a eficiência termodinâmica do ciclo (DECLAYE, 2009).

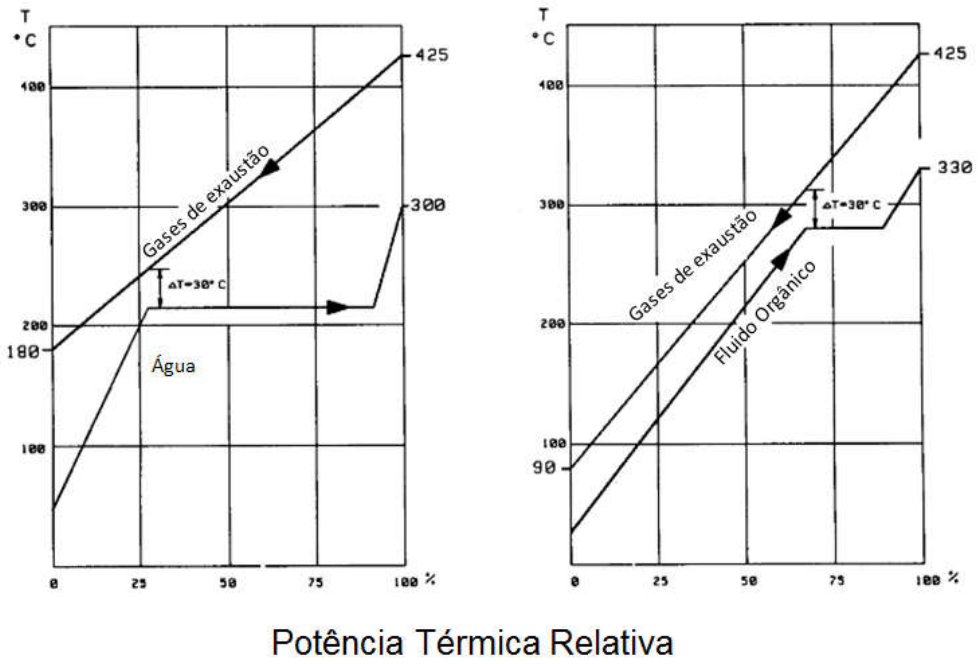


Figura 1 – A entalpia de evaporação de fluidos orgânicos é menor do que a da água. O fluido orgânico "acompanha" a fonte quente de forma mais eficiente (no exemplo da figura os gases de exaustão de uma turbina).

Fonte: Figura adaptada de (LARJOLA, 1995)**.**

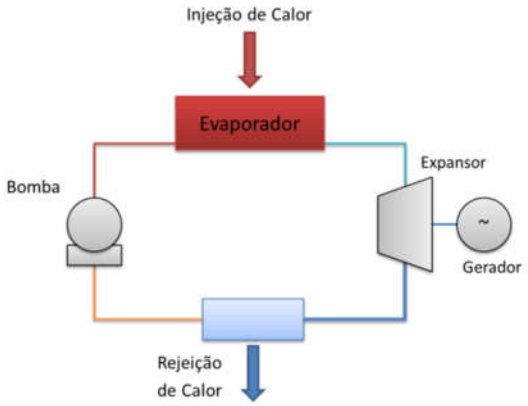


Figura 2 - Ciclo Rankine Típico

A seleção do fluido orgânico envolve uma análise complexa, sendo um ponto chave na concepção do ciclo e um dos principais tópicos estudados pelos fabricantes da

tecnologia. De acordo com WANG e ZHAO (2008), o fluido deve satisfazer alguns critérios básicos: estabilidade química, não gerar deposição de matéria e não ser corrosivo. Um estudo desenvolvido por MAGO, *et al.* (2007) mostrou que fluidos secos ou isentrópicos apresentam melhores eficiências termodinâmicas devido ao fato de não condensarem durante o processo de expansão, como mostrado na Figura 3.

Porém, deve-se sempre ressaltar que o uso de fluidos capazes de causar danos à camada de ozônio (alto índice ODP – *ozone depletion potential*) e com alto índice GWP (*global warming potential*) não é recomendado, sendo este também um fator de ponderação relevante na escolha do fluido de trabalho. Trabalhos recentes têm indicado o R245fa como um fluido com grande potencial para ciclos ORC (LUJAN, *et al.*, 2011), sendo este, inclusive, um dos fluidos utilizado nos produtos dos principais fabricantes.

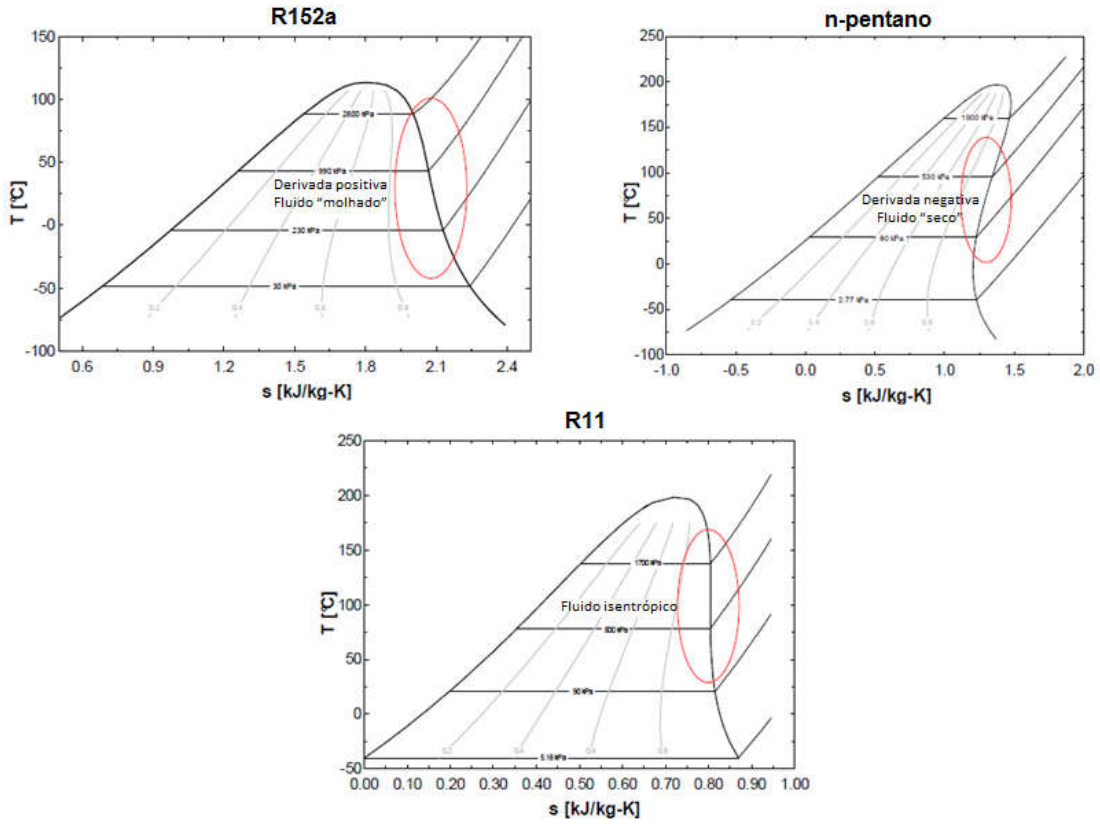


Figura 3 - Comparação do diagrama T-s de diferentes fluidos orgânicos.

Fonte: (MAGO, CHAMRA, *ET AL.*, 2007)

Quando comparados a alternativas de produção de energia elétrica com fontes de temperatura inferiores, os ORCs possuem as seguintes vantagens (VESCOVO, 2009):

- Alta eficiência da turbina (acima de 85%);
- Baixa rotação da turbina, permitindo acoplamento ao gerador sem reduções;
- Ausência de erosão nas paletas da turbina devido ao fato de não operar com misturas (no caso de fluidos "secos");
- Baixo *stress* mecânico na turbina devido à sua baixa velocidade periférica;
- Capacidade de operação em carga parcial sem drásticas quedas de rendimento (Figura 4).
- Equipamentos com vida útil superior a vinte anos.

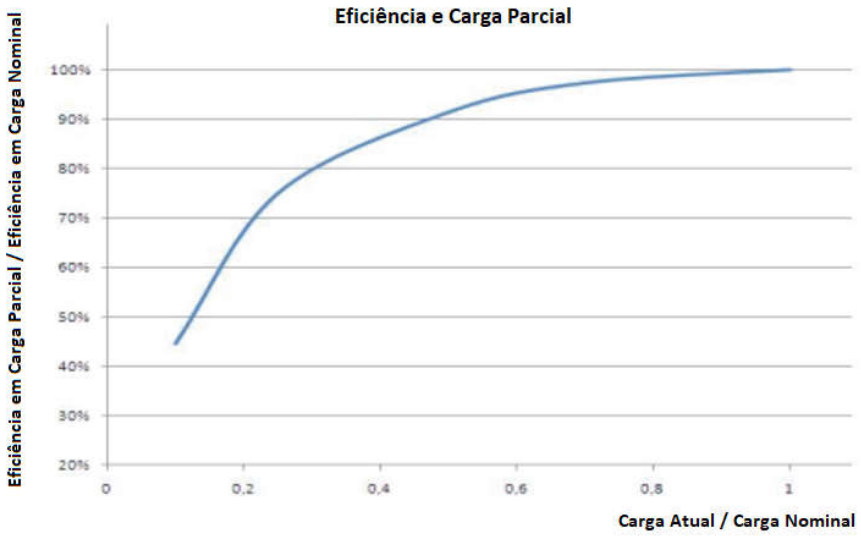


Figura 4 – Desempenho de ORCs em Cargas Parciais.

Fonte: (TURBODEN, 2013)

Ademais, apesar de os sistemas tradicionais de ciclos Rankine a vapor serem considerados uma forma eficiente e barata para a recuperação de calor residual, isso só se aplica para temperaturas na fonte quente da ordem de 500 °C e unidades de maior porte. Em temperaturas inferiores, o custo desses sistemas sobe consideravelmente devido aos seguintes pontos:

- O vapor de baixa pressão gerado por uma fonte de baixa temperatura necessita de equipamentos maiores e mais volumosos;

- As fontes de calor de baixa temperatura podem não fornecer energia suficiente para superaquecer o vapor, causando condensação no processo de expansão na turbina, o que acarreta em erosão.

Além disso, os ORCs também possuem um conjunto de desvantagens que devem ser sempre evidenciadas, são elas:

- Baixa eficiência média total de conversão (Entrada de Energia / Saída de Trabalho Útil), devido à limitação de temperatura da fonte quente, atingindo, portanto, eficiência de Carnot inferiores.
- Alguns fluidos orgânicos podem necessitar de medidas de segurança mais severas, seja por serem inflamáveis, ou tóxicos.
- Para o caso brasileiro, em particular, a ausência de fabricantes nacionais causa aumento nos custos de aquisição.
- Como a tecnologia só está amplamente divulgada em alguns países desenvolvidos, existe uma escassez de conhecimento referente à operação e manutenção das unidades, bem como know-how consolidado para elaboração de projetos.

As máquinas a vapor que operam com o ciclo Rankine convencional, tendo água como fluido de trabalho, também poderiam ser utilizadas para a produção de energia utilizando calor de rejeito. Porém, o ciclo Rankine orgânico possui algumas vantagens em relação ao convencional, esquematizadas na Figura 5.

A curva de saturação característica do fluido orgânico permite uma expansão seca mesmo sem superaquecimento, além disso a menor temperatura de vaporização do fluido faz que com o sistema possa operar com temperaturas e pressões mais moderadas. Em contrapartida, ao operar com menores temperaturas, o salto entálpico da expansão se torna menor. Esse fator é compensado pelo maior peso específico do fluido para não comprometer a produção de potência, que é um parâmetro dependente da vazão e variação entálpica. Consequentemente, a menor velocidade do escoamento reduz o stress mecânico das turbinas e a erosão em suas paletas, Figura 6.

Figura 5 - Características positivas de um ORC.

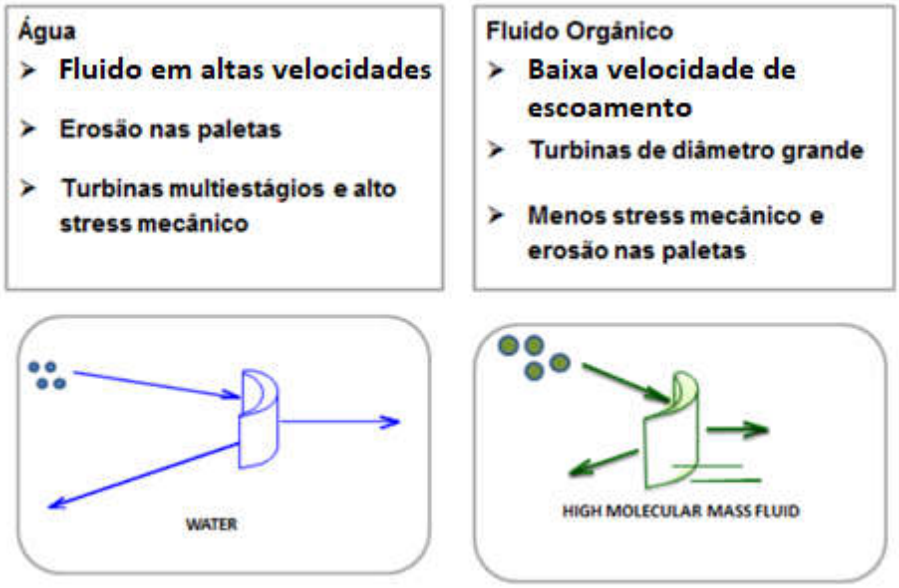


Figura 6 - Comparação entre a água e o fluido orgânico.

Máquinas a vapor com potências inferiores a 5 MW possuem eficiência isentrópicas relativamente menores, o gráfico da Figura 8 mostra esse comportamento para diferentes níveis de pressão.

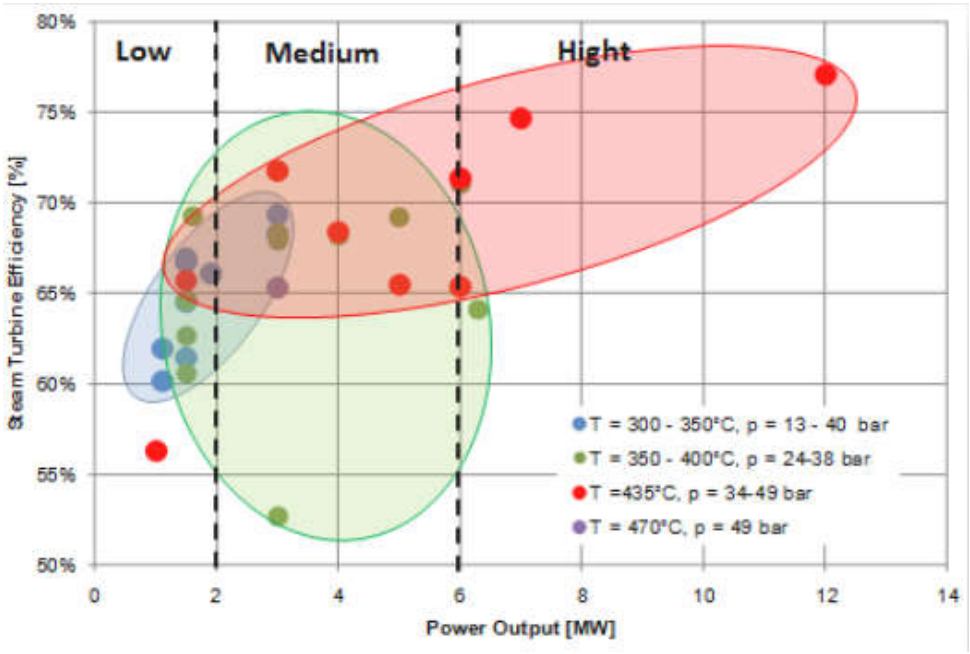


Figura 7 – Comparação da eficiência isentrópica na expansão de unidades a Vapor.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Ao comparar e eficiência termodinâmica do ciclo (razão entre o trabalho produzido e o calor fornecido) utilizando fluido orgânico e a água fica claro que as máquinas ORC de menor potência são mais eficientes do que máquinas que utilizam água em seu ciclo. A Figura 8 mostra a variação da eficiência termodinâmica de turbinas a vapor em diferentes potências e mostra que em baixas potências o ORC torna-se mais eficiente.

Assim, a utilização de ciclos Rankine orgânicos tem se mostrado uma solução adequanda para o aproveitamento dos rejeitos térmicos industriais.

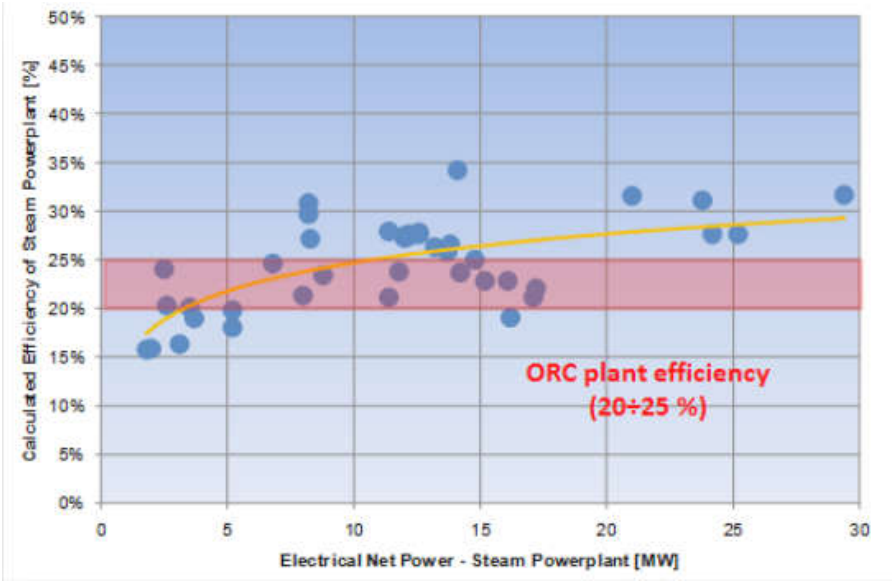


Figura 8 - Eficiência termodinâmica de ciclos Rankine a vapor com sistemas ORC.

Fonte: (TURBODEN, 2013)**.**

1.2 – Aplicações Típicas de ORCs

Devido às suas características fundamentais, baixa temperatura e entalpia de vaporização e expansão "seca" na turbina, os ciclos Rankine orgânicos ganharam um conjunto diverso de aplicações, semelhantes naquilo que tange o funcionamento do ciclo de potência, mas diversificadas em relação às fontes de energia da máquina térmica, sendo as mais comuns:

- Geotérmica;
- Biomassa;
- Solar;
- Recuperação de Calor (Industrial e "Fechamentos de Ciclos[3]")

[3] Entende-se como "Fechamento de Ciclo" o uso dos gases de exaustão de uma turbina a gás (ciclo Brayton) como fonte térmica de um outro ciclo de potência (Rankine), caracterizando um Ciclo Combinado.

As aplicações de biomassa e, principalmente, geotérmicas possuem maior maturidade do que as demais, enquanto o uso de fontes solares se encontra em etapa mais experimental, com um menor número de unidades instaladas.

A recuperação de calor com ORC vem ganhando popularidade continuamente, podendo aumentar a eficiência das instalações industriais e reduzir os efeitos da poluição térmica. A Tabela 3 mostra uma comparação básica das diferentes aplicações dos ORCs, que serão descritas com mais detalhes em sequência.

Tabela 3 - Características gerais das aplicações de ORCs.

Aplicação	Maturidade	Emissões de GEEs	Características de Operação
Geotérmica	Madura	Muito baixas	Simples
Biomassa	Madura	Não	Operação e manutenção complexas devido à logística do combustível
Solar	Aplicações piloto	Sim	Necessidade de combustível se não houver armazenamento. Adequado para geração distribuída ou sistemas isolados
Recuperação de Calor	Crescimento recente da penetração no mercado	Não	Acoplado a processos, viabilidade depende das características do calor

1.2.1 – Recuperação de Calor de Processos

O calor residual de processo ocorre devido às ineficiências de equipamentos e por conta das limitações termodinâmicas dos processos. O calor é gerado por processos de combustão ou reações químicas, onde parte da energia é utilizada no processo e o restante é eliminado, sendo normalmente descartado para o ambiente na forma de gases de exaustão ou vapor. Apesar de toda a energia perdida nos gases residuais, esta não pode ser completamente recuperada devido às limitações da segunda lei da termodinâmica, uma parcela significativa dessa energia pode ser usada para diversos propósitos visando

aumentar a eficiência do processo, acarretando consequentemente também na redução dos custos com combustíveis e reduzindo as emissões do processo como um todo.

Esse calor residual pode ser recuperado para aplicações térmicas ou convertido em eletricidade. Como a conversão de calor em eletricidade envolve perdas intrínsecas em seus processos, tende-se a preferir a utilização direta do calor residual para suprir alguma outra demanda térmica da unidade industrial. Porém, em casos onde essa opção não é viável, o calor residual pode ser convertido em eletricidade (Waste Heat to Power – WHTP), que pode ser consumida pela própria unidade industrial ou disponibilizada na rede.

A aplicação tema desse estudo está associada ao uso de ORCs para recuperação de calor de processos industriais. Apesar de não ser o uso mais comum dos sistemas ORC atualmente, essa aplicação pode apresentar consideráveis vantagens econômicas numa planta industrial (VESCOVO, 2009). Porém, também acarreta em um conjunto de desafios, tendendo a ser, na grande maioria dos casos, projetos mais complexos quando comparados ao desenvolvimento de unidades *greenfield* de biomassa ou geotermia.

A razão do calor não ser utilizado está normalmente associada à falta de espaço na planta ou a razões econômicas. Entretanto, o aumento gradativo dos preços da eletricidade para a indústria vem alterando a viabilidade econômica de projetos, sendo o principal incentivo para o desenvolvimento de sistemas de geração de eletricidade a partir de calor residual e, se certas quantidades, qualidades e constâncias do calor residual forem atingidas, pode ser conveniente a adoção de sistemas ORC.

Uma ênfase pode ser dada à indústria de produção de cimento, que possui processos extremamente endotérmicos, necessitando de fontes quentes para ocorrer (CASCI, *et al.* 1981). Dessa forma, calor de rejeito é gerado no aquecimento da reação e na câmara de combustão de gás, utilizada para pré-aquecimento do material bruto. As indústrias típicas de cimento utilizam cerca de 3 a 5 GJ de calor por tonelada de clínquer (IIP, 2016). Estima-se que, caso um ORC seja instalado para utilizar o calor de rejeito, aproximadamente 1 MW de potência elétrica para cada 1000 toneladas de clínquer possa ser produzido. Uma fábrica com capacidade entre 2000 a 8000 toneladas de clínquer por dia possuirá um bom potencial energético, podendo gerar até cerca de 20% da eletricidade produzida via ORCs (VESCOVO, 2009).

A seguir é mostrado um exemplo de recuperação de calor de processos. Outros exemplos adicionais podem ser encontrados no APÊNDICE I.

Fábrica de Cimento:

Figura 9 - Unidade ORC em uma fábrica de cimento no Marrocos.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Local: Marrocos – Ciments du Maroc

Capacidade produtiva: 5.000 toneladas/dia

Fonte de Calor: Gás de exaustão do forno (*kiln*), com temperatura média de 330°C, sendo resfriado até 220 °C (o restante do calor é utilizado para pré-aquecimento da matéria-prima)

Potência Elétrica Gerada: 2 MW

1.2.2 – Fechamento de Ciclos de Potência

A aplicação de ORCs para recuperação de calor de unidades geradoras de energia elétrica também deve ser destacada, sendo uma das principais aplicações de recuperação de calor da tecnologia (ORC World Maps, 2016).

Algumas unidades apresentam um conjunto de características extremamente favoráveis para o uso de ORCs, como no caso de grupos geradores (motores) e turbinas a gás de menor porte. Isso ocorre, dado que, a temperatura de exaustão disponível tende a ser menor, conforme FORNI, *et al*., (2014).

As turbinas a gás, quando operando em cargas parciais, operam com eficiência consideravelmente menor, liberando maiores quantidades de calor na exaustão. Esse fato cria a possibilidade de aumento da eficiência através do incremento da potência produzida via o uso de um ciclo em bottoming.

Além disso, tanto turbinas a gás aeroderivadas quanto grupos geradores, possuem tempos de partida rápidos e alta capacidade de variação de carga em curtos intervalos de tempo, dessa forma o sistema acoplado a essas unidades deve apresentar as mesmas características de maneira a não reduzir as funcionalidades das máquinas principais.

A recuperação de calor de turbinas a gás através de sistemas a vapor em plataformas de petróleo e seus desafios foram analisados por NORD e BOLLAND (2013), indicando as dificuldades de espaço, peso adicional e complexidade operativa do processo a vapor. De maneira a mitigar esses elementos, BARRERA (2013) propõe o uso de ORCs, e realiza um estudo da viabilidade técnica do sistema operando em plataformas offshore em diferentes configurações.

Ademais, o uso de ORCs para o "fechamento de ciclo" de turbinas a gás (principalmente aeroderivadas) e grupos geradores tende a ser viável, visto que os sistemas ORC respondem rapidamente às variações nas condições da fonte quente (temperatura e vazão), bem como conseguem operar com alta eficiência em cargas parciais.

As temperaturas das principais unidades geradoras que viabilizam os sistemas ORC são mostradas na Tabela 4.

De acordo com ROWSHANZADEH (2010), fabricantes de unidades geradoras como a Wartsila já analisaram diversas opções para aumentar a eficiência de seus produtos no mercado, sendo que a empresa investigou as alternativas de oferecer sistemas ORC acoplados a seus motores.

Tabela 4 - Temperaturas médias da exaustão de unidades geradoras.

Tipo de Sistema	Temperatura dos Gases de Exaustão [°C]
Turbina a Gás	370 - 540
Motor Alternativo	315 - 600
Motor Alternativo (turbo)	230 - 370

Fonte: (KALTSCHMITT, STREICHER E WIESE, 2007)

A empresa TURBODEN (2015), fabricante de ORCs, disponibiliza informações considerando o efeito da adoção de ORCs acoplados a motores (Figura 10) e turbinas a gás (Figura 11).

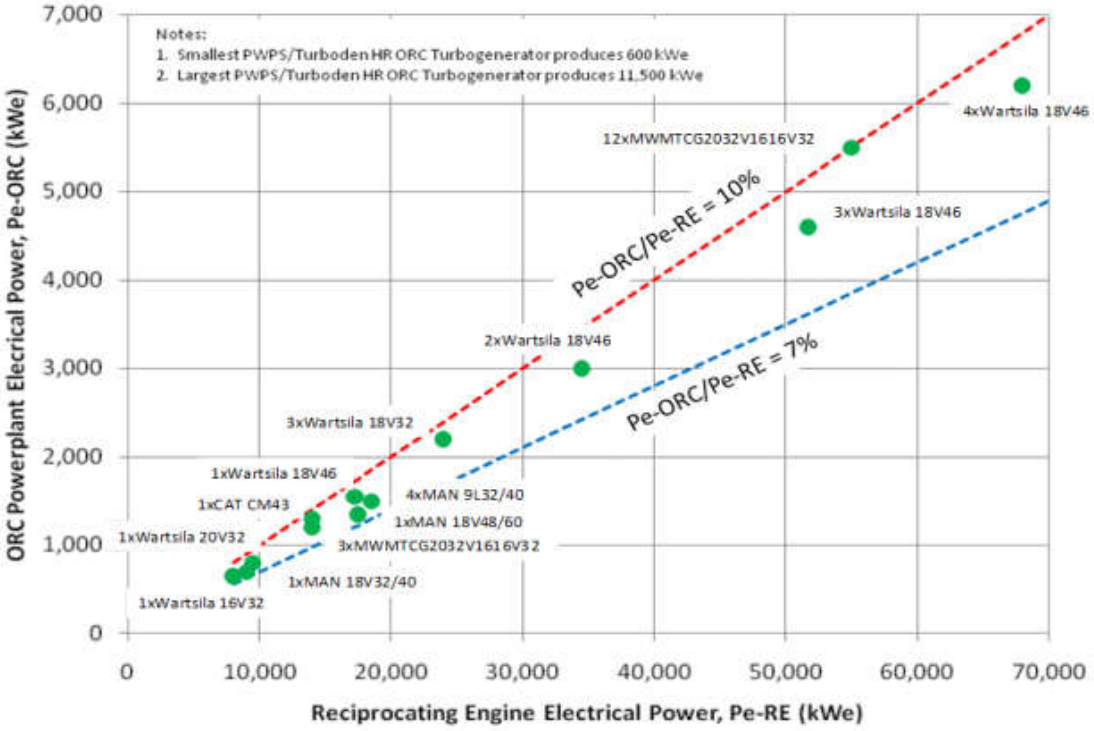


Figura 10 – Ganhos típicos de potência pelo uso de ORC na exaustão de motores de combustão interna.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Verifica-se que o incremento de potência é significativo, principalmente quando os ORC são acoplados a turbinas a gás, atingindo incrementos de potência entre 25% e 35% para um mesmo consumo energético de combustível.

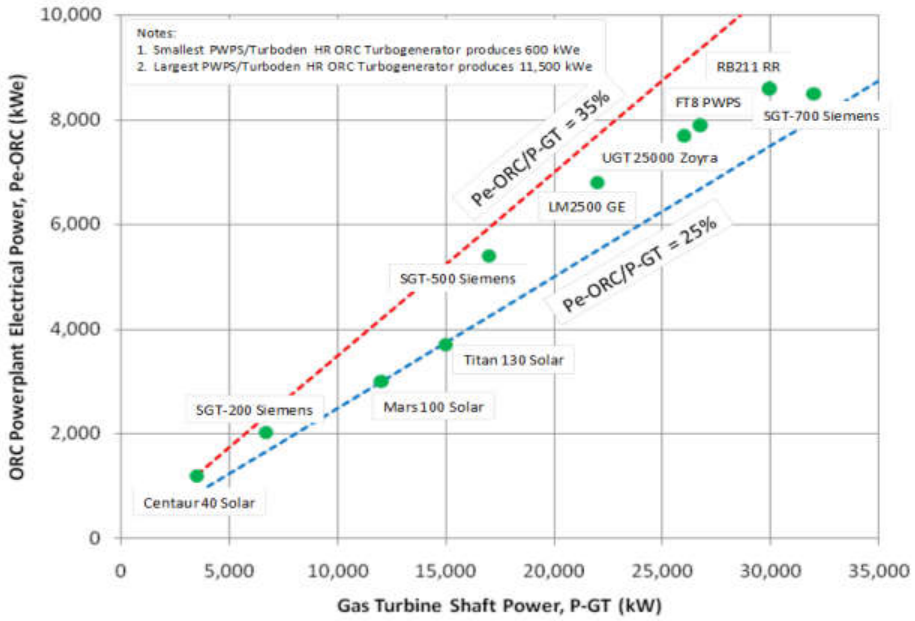


Figura 11 - Ganhos de potência pelo uso de ORC na exaustão de Turbinas a Gás.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Na Figura 12 é mostrado um esquema do processo de "fechamento de ciclo" em uma unidade de compressão de gás natural no Canadá, sendo as características básicas do empreendimento listadas a seguir:

Estações de Compressão de Gás:

Local: Canadá – TransGas

Potência da Turbina a Gás: 3,5 MW (Eficiência de 28%)

Fonte de Calor: Exaustão da turbina a gás (ciclo bottoming)

Potência Elétrica Gerada: 1,0 MW

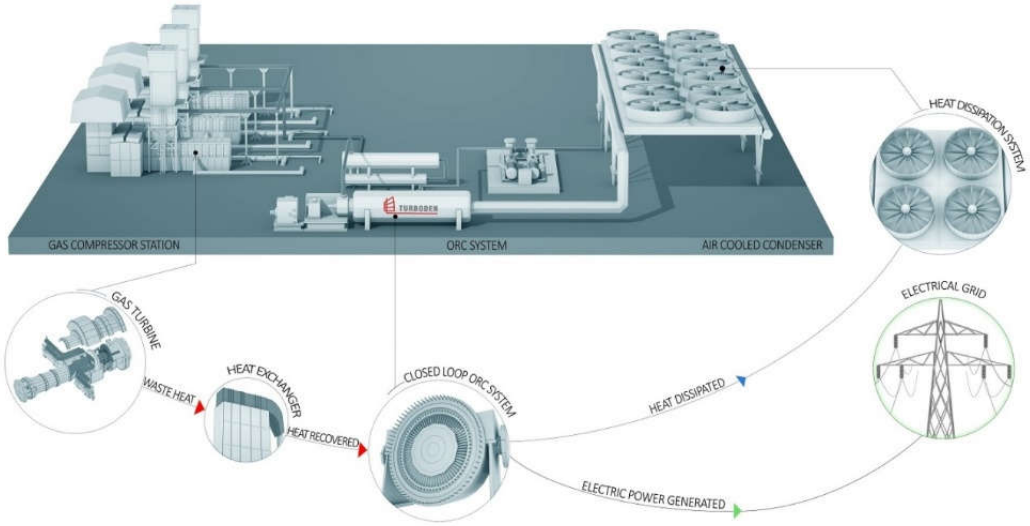


Figura 12 - Turbina Solar Centaur, utilizada para compressão de gás.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

1.2.3 – Biomassa

A grande disponibilidade de biomassa como combustível sólido em diversas áreas, principalmente no Brasil, faz com que esse combustível se torne uma opção para produção de eletricidade que vem ganhando cada vez mais importância no cenário internacional. Tradicionalmente, o Brasil já faz uso de biomassa como uma fonte importante em sua matriz energética. Entretanto, isto está diretamente relacionado ao uso de bagaço de cana-de-açúcar como combustível em usinas de açúcar e etanol (EPE, 2016). A disseminação de sistemas de geração de energia em pequena escala, fazendo uso de biomassa como combustível começou a ganhar relevância no Brasil apenas nos últimos anos (ANEEL, 2017).

Na Europa, e principalmente na Alemanha, a adoção de biomassa para geração de energia em pequena escala ganhou grandes proporções na última década (ORC World Maps, 2016). O uso de ORCs se mostrou uma opção extremamente viável, tanto por não ser muito impactado com a queda de eficiência à medida que a potência é reduzida, como ocorre nos ciclos a vapor, quanto por apresentar uma atratividade econômica maior

quando comparado com sistemas a vapor convencionais em pequenas escalas. Um único fabricante de ORCs europeu possuía em 2017 cerca de 300 unidades instaladas em sistemas de biomassa, sendo aproximadamente 25% delas na Alemanha (TURBODEN, 2017). Como resultado, os sistemas ORC de biomassa ocupam uma parcela significativa do mercado da tecnologia, ficando atrás apenas da aplicação geotérmica.

Os sistemas ORC com biomassa possuem algumas peculiaridades quando comparados com as demais aplicações devido ao uso de caldeiras/aquecedores de fluido térmico para a combustão da biomassa e disponibilização de calor para a máquina térmica. Por demandar temperaturas mais baixas para o funcionamento do ciclo, a queima da biomassa em sistemas ORC ocorre em temperaturas em torno de 300ºC (LORA e ANDRADE, 2009), sendo, portanto, menos custosa do que em sistemas a vapor que demandam temperaturas de queima mais elevadas. A Figura 13 mostra a configuração típica de um sistema ORC operando com biomassa.

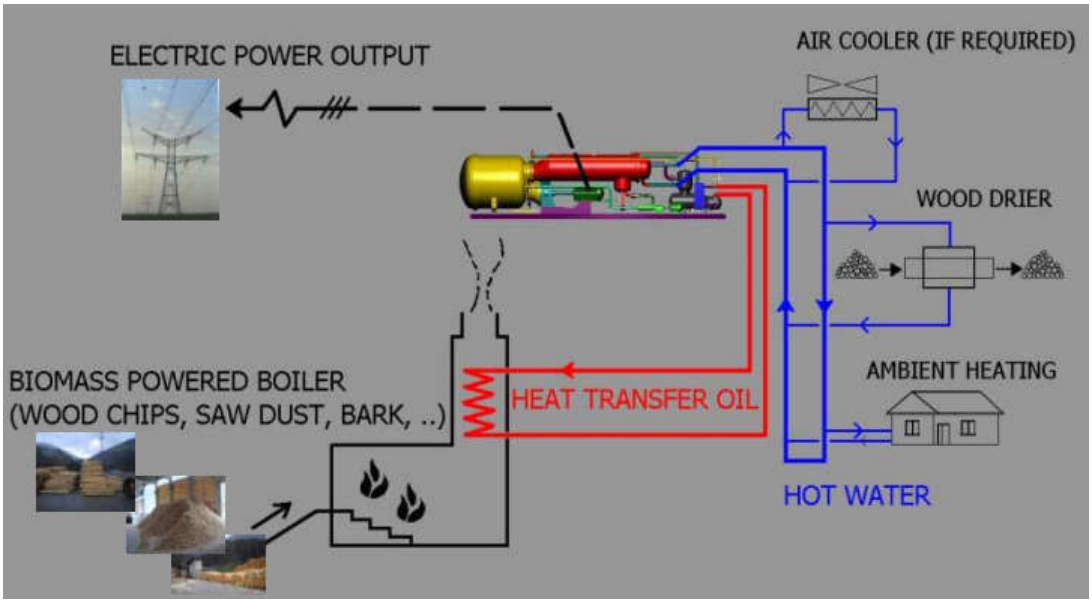


Figura 13 - Sistema ORC utilizando biomassa como fonte térmica.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Entretanto, deve-se estar atento à temperatura máxima da fonte quente, dado o fato de que o fluido orgânico quando sujeito a altas temperaturas de operação pode apresentar instabilidade e dissociação por conta de reações químicas.

Além dos ganhos termodinâmicos dos sistemas ORC para biomassa, cabe ressaltar que essa aplicação vem ganhando força em relação ao uso de unidades maiores devido à questão logística. O custo de transporte de um produto de pouco valor agregado, como a biomassa residual é um limitante para a viabilidade econômica do sistema de geração, portanto ao fazer uso de unidades menores, pode-se alocar de forma ótima as unidades geradoras, mantendo-as próximas do local de fornecimento do combustível (ALVES, *et al.*, 2012).

A seguir é apresentado um exemplo de unidade ORC operando com biomassa com combustível. Outro caso de referência é apresentado no Apêndice I.

Produção de Energia e Aquecimento Distrital:

Local: Itália – Vipiteno

Combustível: cavaco de madeira residual

Aquecimento: Produção de 5,5 MWth de água quente para aquecimento das casas próximas do local.

Potência Elétrica Gerada: 1,2 MW

Figura 14 - Unidade de geração de energia via ORC utilizando Biomassa. Destaque à direita para o sistema de distribuição de calor (água quente) distrital.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

1.2.4 – Sistemas Termosolares

Outra aplicação para ORCs seria em sistemas de produção de energia termosolares. Estima-se que menos de 1% dos sistemas termosolares utilizem ORC como unidade de produção de potência (ORC World Maps, 2016), indicando um potencial futuro para sua aplicação devido a um conjunto de caraterísticas descritas a seguir.

Em ciclos vapor convencionais (Rankine) altas temperaturas são sinônimo de melhores eficiências e dessa forma as unidades termosolares têm focado no uso de coletores capazes de concentrar a energia em um ponto, aumentando a temperatura máxima da fonte quente. Entretanto, ao analisar algumas nuances do processo, pode-se identificar uma série de justificativas para a adoção de ORCs.

Conforme já mencionado, os ciclos vapor convencionais sofrem gradativa queda de rendimento quando operando em baixas temperaturas de vapor. Além disso, para evitar condensação durante o processo de expansão de vapor na turbina, um superaquecimento é necessário, demandando, em função da pressão, temperaturas da ordem de 600 ºC. A necessidade de operar em tais níveis de temperatura em sistemas termosolares é extremamente custosa, demandando concentradores solares, armazenamento térmico de altíssimas temperaturas, e outras soluções de alto custo.

Porém, ao fazer uso de ciclos ORC evita-se automaticamente a necessidade de altas temperaturas na fonte quente e o problema de condensação durante o processo de expansão. Ademais, em regiões frias se deve considerar os problemas de congelamento do fluido de trabalho (água), outro problema inexistente nos ORCs devido ao uso de refrigerantes como fluido de trabalho. Dessa forma, as aplicações termosolares com ORCs podem apresentar custos de instalação inferiores às unidades convencionais com água/vapor (Jing, *et al.*, 2010).

Finalmente, sistemas termosolares ainda podem ser combinados com unidades de armazenamento térmico que teriam custos razoavelmente mais baixos caso o fluido de trabalho necessite de temperaturas de vaporização mais baixas, indicando outra vantagem dos ORCs.

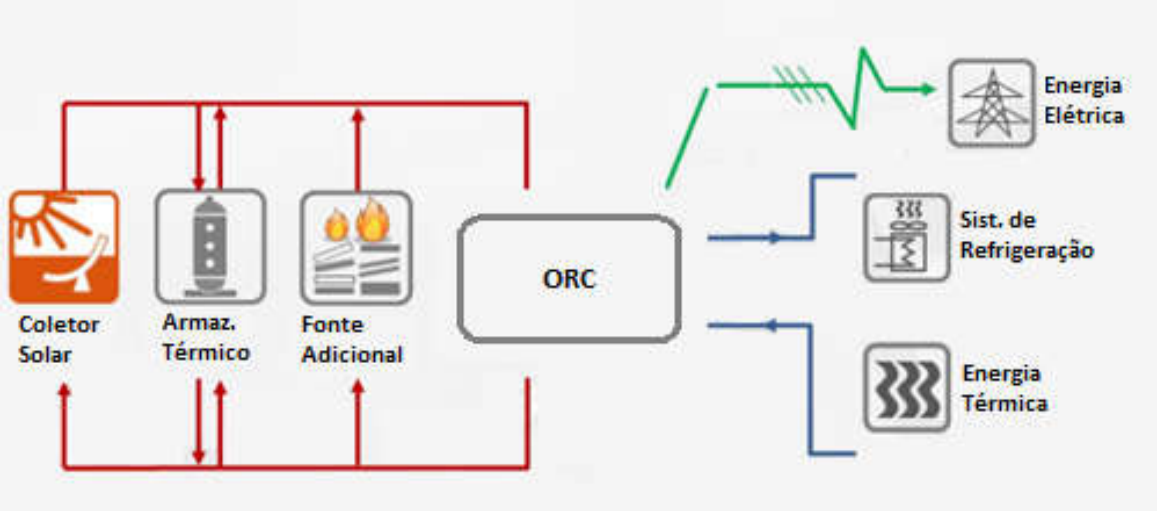


Figura 15 - Configuração de um sistema termosolar com ORC.

Fonte: Adaptado de (TURBODEN, 2015)

Ademais, segundo BRUNO, *et al.* (2008), os sistemas termosolares ORC recebem pouca atenção quando comparado às soluções fotovoltaicas, mesmo apresentando custos de geração inferiores.

Como exemplo, pode-se citar a unidade ORC instalada um uma usina termosolar na Itália (Figura 16), contanto com seis *loops* de coletores solar do tipo Fresnel, com aproximadamente 10.000 m² de área e sistema de armazenamento térmico com dois tanques e capacidade térmica equivalente a 5 horas de operação. A potência instalada é de 0,65 MW.

Na Figura 17 é exibido um sistema termosolar híbrido, que recebe calor tanto dos coletores solares quanto do calor do processo da produção de cimento. Essa unidade está localizada no Marrocos e possui uma área de 6.150 m², com três *loops* de 215 m de lentes. Além disso o sistema conta com tanques de termoacumulação com capacidade de 12 horas de operação. A potência instalada é de 2 MW.

Figura 16 - Lentes Fresnel da Unidade ORC termosolar da ENAS.

Fonte: (TURBODEN, 2013)

Figura 17 - Imagens do sistema Termosolar híbrido instalado na fábrica de cimento.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

1.2.5 – Sistemas Geotérmicos

A energia geotérmica armazenada na Terra é considerada uma fonte renovável para produção de eletricidade, possuindo uma característica fundamental: a baixa temperatura dos poços potenciais geotérmicos, geralmente entre 50 e 350 ºC (ROWSHANZADEH, 2010). Para atingir temperaturas mais elevadas, poços mais fundos são necessários, levando ao incremento de custos de instalação.

Os sistemas ORC ampliaram o uso de poços geotérmicos de menores temperaturas devido à sua característica de baixa temperatura de evaporação de seus fluidos de trabalho. A Figura 18 mostra um esquema de configuração de um ORC para produção de eletricidade a partir de fontes geotérmicas.

Atualmente, a ORMAT é o fabricante de sistemas ORC com maior número de unidades em plantas geotérmicas operacionais. No ano de 2016, 76% das unidades ORC instaladas no mundo eram de plantas geotérmicas (ORC World Maps, 2016).

Nos sistemas geotérmicos binários, o fluido é extraído do reservatório subterrâneo e direcionado para trocadores de calor. Nos trocadores de calor o fluido geotérmico aquece um fluido secundário (fluido de trabalho do ciclo ORC), que possui baixa temperatura de evaporação. O fluido orgânico vaporizado aciona a turbina, produzindo potência útil e é direcionado para um condensador, normalmente resfriado a ar. O fluido geotérmico resfriado e injetado novamente no reservatório geotérmico.

Já os sistemas geotérmicos de ciclo combinado fazem uso tanto de uma unidade ORC quanto de um ciclo vapor com turbina a vapor.

Vapor a alta pressão é produzido no reservatório geotérmico e direcionado para um separador de misturas, garantindo que apenas vapor seja direcionado para uma turbina. A turbina expande o vapor, produzindo potência. Como a temperatura na saída da turbina ainda é suficiente para vaporizar um fluido orgânico, nesse ponto é inserido um trocador de calor que funcionará como fonte quente para um ciclo ORC. Finalmente, o vapor condensado do ciclo vapor é injetado no reservatório geotérmico.

Cabe também citar que os ciclos “combinado” e “binário” podem ser integrados para incremento da eficiência geral do sistema, conforme exemplificado na Figura 18.

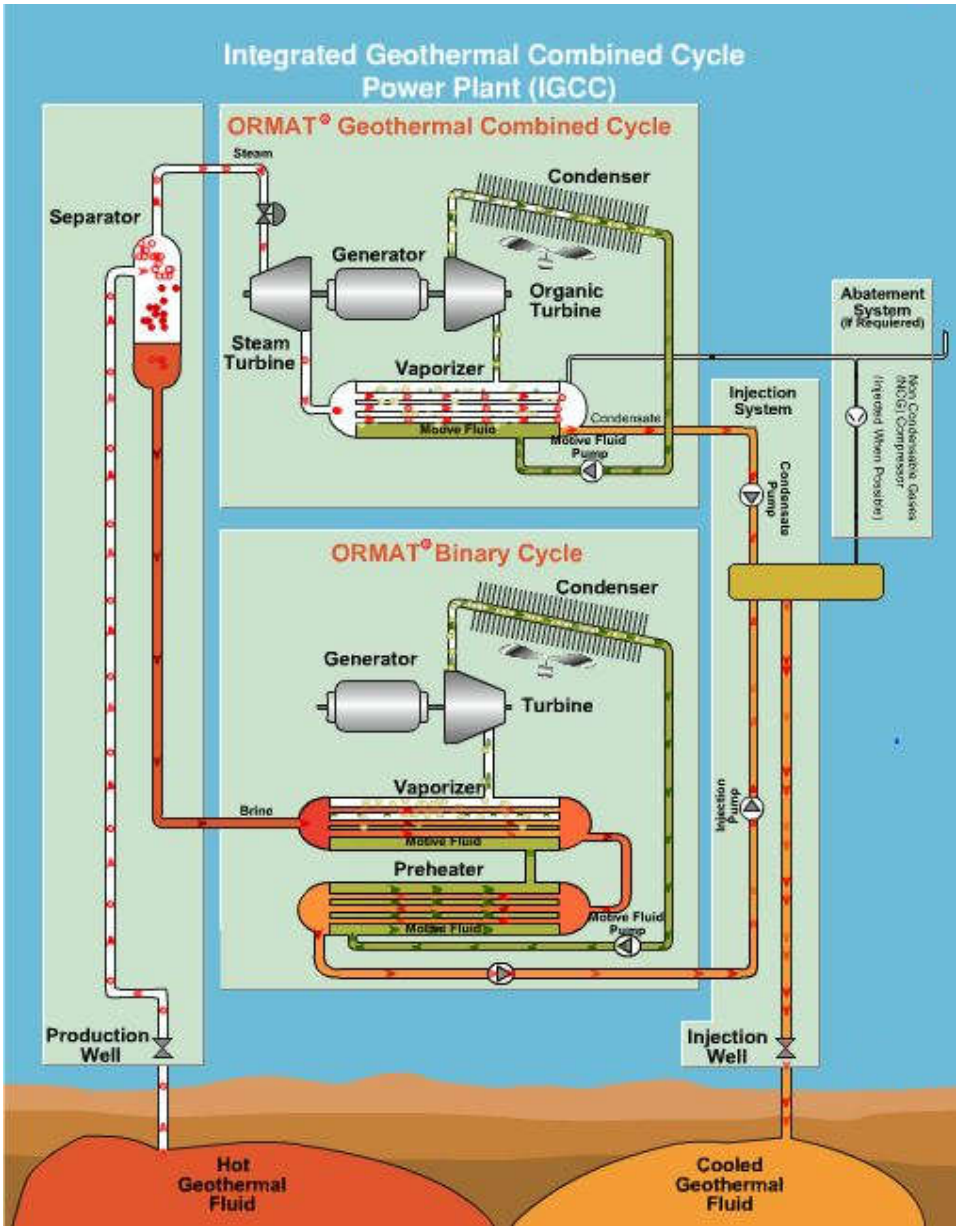


Figura 18 - Produção de eletricidade em fontes geotérmicas utilizando ORCs.

Fonte: (ORMAT, 2015)

Os poços geotérmicos com temperaturas entre 70 e 100 ºC estão em diversas partes do mundo e em maiores quantidades, indicando que o desenvolvimento de trocadores de calor de alta eficiência, aumentaria consideravelmente a eficiência das plantas geotérmicas, uma vez que quanto menor é a diferença de temperaturas entra no trocador,

maior é seu tamanho e a vazão dos fluidos de troca, impactando diretamente no custo total da unidade.

Dessa forma, o desenvolvimento de trocadores de calor eficientes acarretaria em grandes reduções de custo para unidades geotérmicas (quanto menor a temperatura da fonte, maior o ganho econômico). Trocadores de calor de placas de titânio, que possuem bons coeficientes de troca térmica e design compacto são sugeridos por KONTOLENTOS, *et al.* (2010).

A Figura 19 mostra dados para um conjunto de projetos de sistemas ORC com fontes geotérmicas na Europa, destacando a temperatura e a vazão da fonte quente.

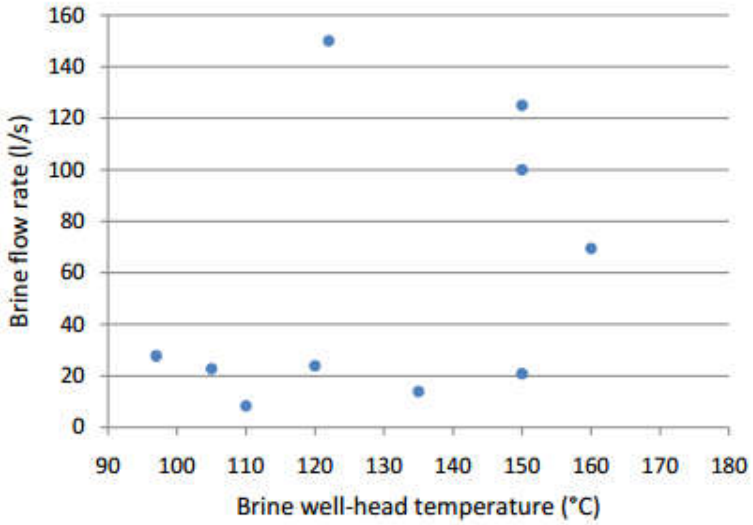


Figura 19 – Exemplos de Projetos ORC Geotérmicos, suas temperaturas e vazões da fonte de calor.

Fonte: (LUKAWSKI, 2009)

Atualmente, o uso de ORC para produção de eletricidade em fontes geotérmicas abaixo de 100 ºC já é economicamente viável, entretanto, faz-se necessário o uso de algumas técnicas para aumentar a eficiência do sistema. Uma sugestão proposta por ROWSHANZADEH (2010) é o uso de um *chiller* por absorção em contato com o condensador do sistema ORC, fazendo com que o *chiller* reduza a temperatura do

condensador, aumentando a diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria do ciclo, causando o aumento da eficiência da máquina térmica.

Dois exemplos de usinas geotérmicas fazendo uso de ORCs são apresentados a seguir,

Unidade Geotérmica:

Local: Havaí – Puma, Big Island

Configuração: Composta duas unidades de potência resfriadas a ar e um sistema binário.

Potência Elétrica Gerada: 38 MW

Figura 20 - Unidade Geotérmica de Puma.

Fonte: (ORMAT, 2015)

Complexo Geotérmico:

Local: EUA – Califórnia, Steamboat Complex, Washoe Country

Configuração: Composta por seis usinas geradoras, atingindo uma potência total de 89 MW (Steamboat 2 e 3; Galena 1, 2 e 3; Steamboat Hills.). Exceto pela usina Steamboat Hills, que utiliza um sistema “single flash” (que faz uso de ciclo vapor convencional), todos os demais projetos são de sistemas ORC binários.

Potência Elétrica Gerada: 89 MW

Figura 21 - Unidades Geradoras ORC de Galena 3.

Fonte: (ORMAT, 2015)

1.3 – Cenário Atual das Aplicações

A evolução tecnológica das últimas décadas permitiu que os ORC se difundissem mundialmente, atingindo em abril de 2016 um total de 2,75 GW de potência instalada (ORC World Maps, 2016). Aproximadamente 76,5% das unidades ORC instaladas no mundo hoje consistem no uso de fontes geotérmicas, 12,7% fazem uso de recuperação de calor como fonte de energia, 10,7% utilizam biomassa, enquanto 0,1% utiliza energia solar (ORC World Maps, 2016). A Figura 22 mostra a distribuição da potência instalada de ORCs em 2016.

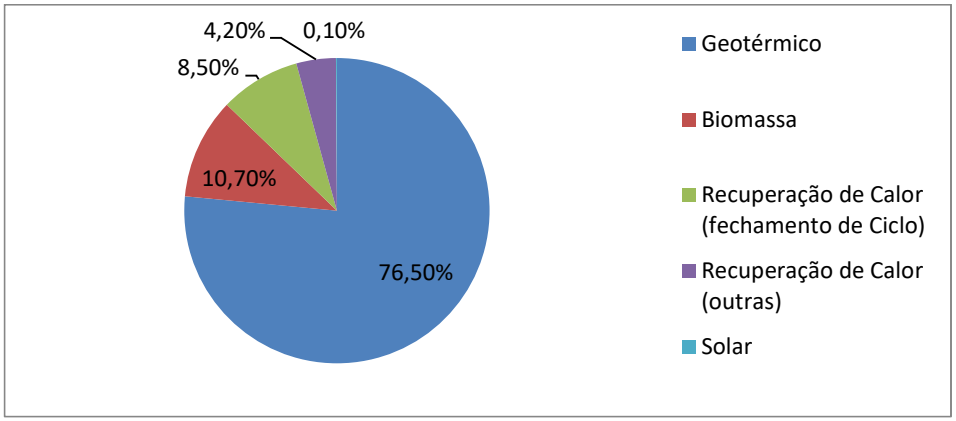


Figura 22 - Aplicações de ORC no mundo.

Fonte: (ORC WORLD MAPS, 2016)

Cabe ressaltar que a pesquisa realizada em (ORC World Maps, 2016) considera as empresas listadas na Tabela 5, que publicam suas unidades em operação.

A distribuição de mercado em função da capacidade instalada, Figura 23, indica uma grande concentração pelo fabricante ORMAT. Essa concentração ocorre, pois, a ORMAT possui diversas unidades na aplicação de geotermia, que naturalmente faz uso de máquinas com potências instaladas mais elevadas do que as demais soluções.

Tabela 5 – Lista de fabricantes de ORCS

Fabricantes		
ABB	Enreco	ORMAT
Adoratec / Maxxtec	Exergy	TAS
BEP E-Rational	Electratherm	TMEIC
Calnetix	General Electric	Triogen
Dürr Cyplan	GMK	Turboden
Enertime	Johnson Control	UTC Power
ENEX	Kaishan	gT - Energy Technologies
ENOGIA	Opcon Energy Systems	

Fonte: (ORC WORLD MAPS, 2016)

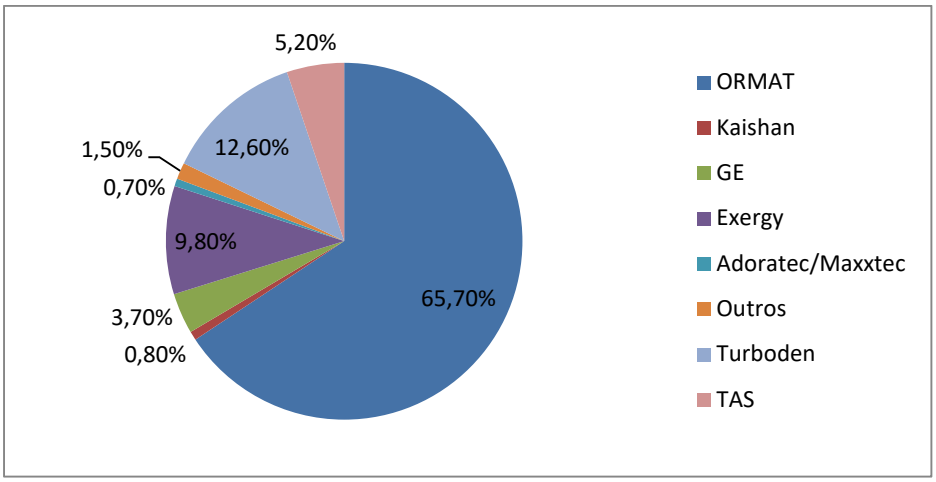


Figura 23 – Distribuição de Mercado de ORCS (janeiro de 2016).

Fonte: (ORC WORLD MAPS, 2016)

Na Figura 24 é possível verificar que os EUA é o país com maior capacidade instalada de ORCs, sendo a ampla maioria das aplicações associada a sistemas geotérmicos. A aplicação de biomassa tem destaque na Alemanha, Itália e Canadá, enquanto os sistemas de recuperação de calor são mais utilizados nos EUA, China e Canadá.

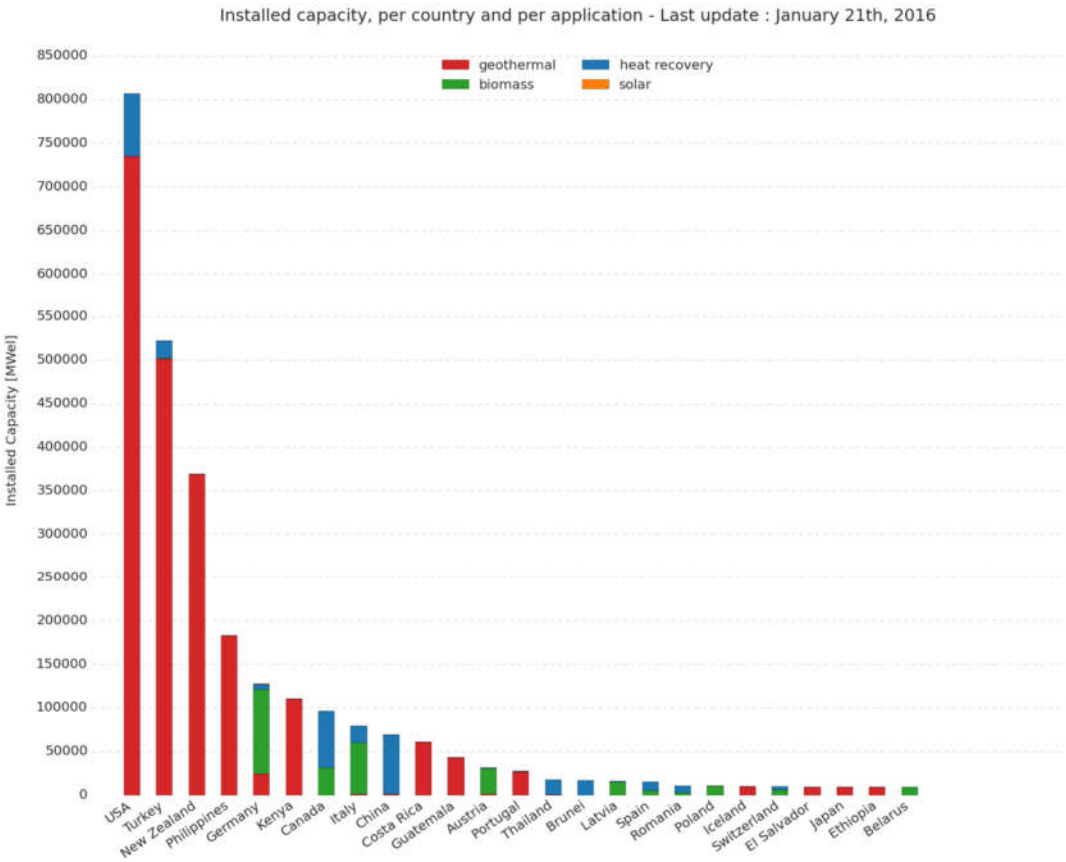


Figura 24 – Distribuição da Potência instalada de ORC por país.

Fonte: (ORC WORLD MAPS, 2016)

As aplicações em recuperação de calor são principalmente focadas na utilização do calor residual de motores e turbinas a gás, representando 66% da capacidade instalada de recuperação de calor residual. Na recuperação de calor residual, deve-se destacar o uso nos setores de cimento, fabricantes primários de metais e vidro, conforme destacado na Figura 25.

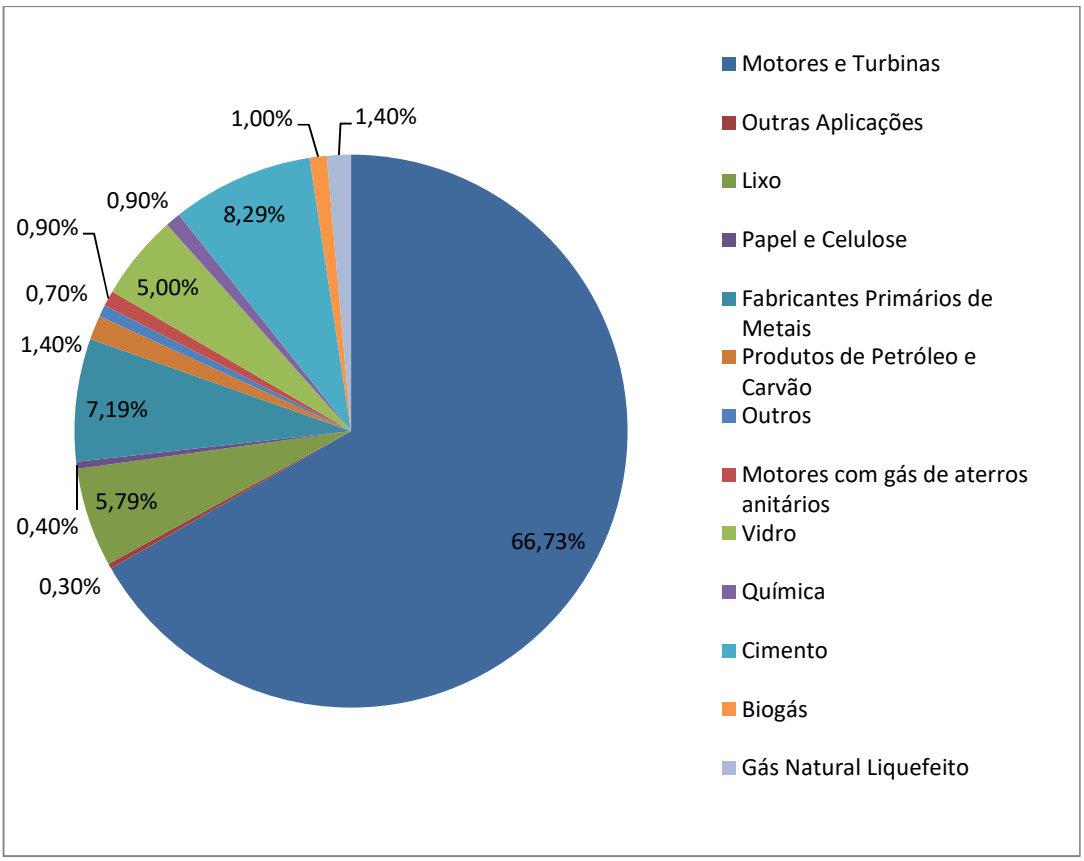


Figura 25 - Aplicações de ORCs em recuperação de calor.

Fonte: (ORC WORLD MAPS, 2016)

Entretanto, apesar da participação das aplicações de recuperação de calor representar menos de 15% da capacidade instalada de ORCs no mundo, se as unidades geotérmicas forem desconsideradas, a recuperação de calor passaria a representar cerca de 54%.

1.4 – Seleção dos Fluidos de Trabalho

Os ciclos Rankine orgânicos possuem seu desempenho diretamente relacionado com o fluido de trabalho utilizado, fazendo com que a seleção desse elemento seja crucial no projeto de tais sistemas.

Diversos tipos de fluidos já foram amplamente analisados na literatura internacional como fluidos de trabalho para produção de potência (TCHANCHE, *et al.*, 2009), (CALM e HOURAHAN, 2007), (CHEN, *et al.,* 2010), (PRIDASAWAS e LUNDQVIST, 2006), sendo aguns dos fluidos tipicamente utilizados descritos a seguir:

- Álcoois: metanol e etanol;
- Fluidos inorgânicos: água, dióxido de carbono e amônia;
- Hidrocarbonetos: propano, n-butano, benzeno, etc.;
- Clorofluorcarbonos (CFCs): R12 e R13 (átomos de hidrogênio na molécula de hidrocarboneto são substituídos com cloro, flúor ou bromo);
- Hidrofluorcarbonos (HFCs): R134a (hidrocarboneto parcialmente halogenado e sem cloro);
- Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs): R22 (hidrocarboneto parcialmente halogenado);
- Perfluorcarbono (PFCs): PP50 (hidrocarbonetos completamente fluorizados);
- Ésteres e Hidrofluoreteres (HFEs): HFE7000, RE134, HFE7100;
- Siloxanos: Octametiltrisiloxano (MDM), Hexametildisiloxano (MM);
- Misturas:
    - Azeotrópicas:
    - Zeotrópicas

A seleção do fluido ideal para a aplicação no ciclo depende de uma otimização em função de um conjunto de critérios fundamentais, conforme discutido por TCHANCHE (2010), a seguir:

- Ponto Crítico:

Condição termodinâmica na qual as propriedades do líquido e vapor se tornam indistinguíveis, isto é, a temperatura, densidade e composição da substância são as mesmas para o estado líquido e gasoso nesse ponto (BADR, *et al.*, 1985).

- Níveis de Pressão:

Níveis de pressão intermediários no evaporador sempre são recomendados visando evitar problemas de estresse do material. Se os níveis de pressão foram muito elevados os custos do sistema se elevam consideravelmente, para garantir as condições de segurança do mesmo (MAIZZA e MAIZZA, 1996). A pressão de saturação no condensador deve ser mantida acima da atmosfera, para evitar problemas de selagem, causando infiltração de ar atmosférico. Dessa forma, recomenda-se que a pressão nos condensadores seja mantida acima de 1 bar e nos evaporadores abaixo de 25 bar (BADR, *et al.*, 1985).

- A Curva T-s

Conforme já mencionado anteriormente, os fluidos podem ser classificados de acordo com a inclinação, ou derivada da curva de saturação, do diagrama T-s no lado do gás. Fluidos secos (derivada positiva), isentrópicos (derivada infinita) ou molhados (derivada negativa) (BADR, *et al.*, 1985). Fluidos molhados não são recomendados para sistemas de baixas temperaturas (HUNG, 2001), pois esses fluidos demandam superaquecimento para evitar a formação de mistura no processo de expansão do gás. Apesar de os fluidos secos apresentarem eficiências térmicas mais baixas do que fluidos molhados, o uso de um regenerador após a expansão na turbina pode reduzir de forma significativa esse problema.

- Volume Específico

Fluidos de trabalho devem ter baixos volumes específicos de líquido e vapor, uma vez que essa propriedade afeta os coeficientes de troca de calor nos trocadores, além de estarem diretamente relacionados com o tamanho (e custo) do elemento de expansão. Ademais, volumes específicos muito altos levam a vazões maiores, o que incrementa as perdas no sistema (TCHANCHE, *et al.* 2010)

- Propriedade de Troca de Calor

É desejável que os fluidos de trabalho possuam baixa viscosidade, baixa tensão superficial e baixo calor específico, combinado com alta condutividade térmica e calor latente de vaporização (WALI, 1980). A razão entre a entalpia de vaporização para a entalpia sensível demandada para aumentar a temperatura do fluido após a etapa de bombeamento deve ser alta, indicando que a maior parte do calor é demandado na evaporação em condições de temperatura mais alta, se aproximando mais do ciclo de Carnot (TCHANCHE, 2010).

- Massa Molecular

A questão da massa molecular depende diretamente do tipo de expansor utilizado. De acordo com LEE, *et. al.*, (1993), para altas temperaturas ou altos níveis de potência fazendo uso de turbinas com vários estágios, fluidos com baixa massa molecular (< 90 g/mol) são mais recomendados, enquanto fluidos de maior massa molecular (>90 g/mol) são mais adequados para menores potências e unidades de expansão de um único estágio, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação da eficiência isentrópica das turbinas utilizando como fluido de trabalho/vapor (baixo peso molecular) e um fluido de trabalho de alto peso molecular.

Potência	Eficiência Isentrópica da Turbina [%]	
	Baixa Massa Molecular	Alta Massa Molecular
> 10 MW	70 a 80	75 a 80
1 a 5 MW	50 a 70	75 a 80
200 a 500 kW	30 a 50	75 a 80
10 a 100 kW	25 a 50	60 a 75

Fonte: (STINE E GEYER, 2001)

- Estabilidade Térmica

Deve-se garantir que o fluido tenha alta estabilidade térmica para garantir uma vida útil longa e reduzir os custos de manutenção da unidade. A decomposição química do fluido causa a redução da eficiência do ciclo e a necessidade de reposição do fluido, bem como pode produzir gases não condensáveis com efeitos corrosivos nos materiais dos componentes do ciclo.

Tabela 7 - Temperatura máxima de estabilidade de alguns fluidos de trabalho

Fluido	Temperatura Máx. de estabilidade
R227ea	425
R23	400
R236fa	400
R143a	350
R245fa	300
R134a	368
R141b	90
R1311	102
R7146	204
R125	396
Metanol	175 a 230
Tolueno	400 a 425
R113	175 a 230

Fonte: (TCHANCHE, 2010)

- Questões de Segurança

Os diferentes fluidos que podem ser usados em ciclos Rankine orgânicos possuem diferentes níveis de flamabilidade e toxidade, sendo fundamental estar tendo para essas características em função da aplicação do ciclo. A tabela da ASHRAE mostra a classificação dos fluidos refrigerantes de acordo com os níveis de flamabilidade e toxidade.

Tabela 8 - Classificação ASHRAE para toxidade e flamabilidade

	Alta toxidade	Baixa toxidade
Alta flamabilidade	A3	B3
Baixa flamabilidade	A2	B2
Não propaga chama	A1	B1

Fonte: (TCHANCHE, 2010)

- Parâmetros Ambientais

Os fluidos são atualmente classificados de acordo com o Potencial de Depleção de Ozônio (*ODP – Ozone Deplation Potential*) e o Potencial de Aquecimento Global (*GWP - Global Warming Potential*). O primeiro está associado à capacidade da substância de destruir moléculas de ozônio atmosférico, enquanto o segundo indica o tempo de vida da substância quando emitida na atmosfera, sendo fundamental, portanto, buscar fluidos com os menores índices ODP e GWP possíveis.

- Desempenho do Ciclo

Finalmente, o fluido selecionado deve garantir eficiências de operação elevadas. Sendo esse o parâmetro principal a ser otimizado durante o processo de seleção do fluido de trabalho.

- Custo

Por razões econômicas, deve-se sempre considerar o custo e a disponibilidade dos fluidos de trabalho.

De maneira resumida, a Figura 26 mostra a aplicação dos fluidos de trabalho em função da temperatura da fonte quente e das diferentes aplicações.

Figura 26 - Tipos de fluidos de trabalho para ORCs em Função da temperatura da Fonte Quente.

Portanto, a seleção de fluidos de trabalho dos ciclos Rankine orgânicos é um tema de pesquisa fundamental para o aumento de desempenho dessas unidades, estando em constante otimização em função das diversas caraterísticas explicitadas.

1.5 – Viabilidade Econômica de ORCs

As unidades ORC são fornecidas por diversos fabricantes, alguns listados na Tabela 5 e parte deles resumidamente detalhada na Tabela 2. Os módulos são ajustados conforme as necessidades do comprador e às características da aplicação do sistema.

Os custos de investimento em sistemas que fazem uso de ciclos Rankine orgânicos variam muito de acordo com a aplicação, e principalmente, em função do tamanho da unidade. Segundo TCHANCHE (2010), os custos de instalação variam entre 1500 a 3500 €/kW. De acordo com OBEMBERGER e HAMMERCHMID (2001), (2002), uma aplicação com biomassa na Áustria apresentou um custo de investimento de 2765 €/kW,

com um custo de geração equivalente a 12,1 c€/kWh (já sendo contabilizado o custo do combustível). Unidades ORC acopladas a motores apresentaram custos variando entre 2500 a 3000 €/kW (TCHANCHE, *et al.*, 2010), sendo o custo de geração de energia equivalente a 5 c€/kWh.

Devido a essa ampla variação de custos em função da aplicação, os custos de sistemas ORC não podem ser facilmente generalizados sem levar em conta o tamanho e aplicação. A Figura 27, mostra como para uma determinada aplicação o custo específico tende a ser reduzido à medida que a potência é aumentada. Segundo QUOILIN, *et al.* (2013), os custos de investimento mais baixos são encontrados em aplicações de Recuperação de Calor Residual, enquanto unidades geotérmicas e de biomassa (CHP – *Combined Heat and Power*) apresentam o maior custo total.

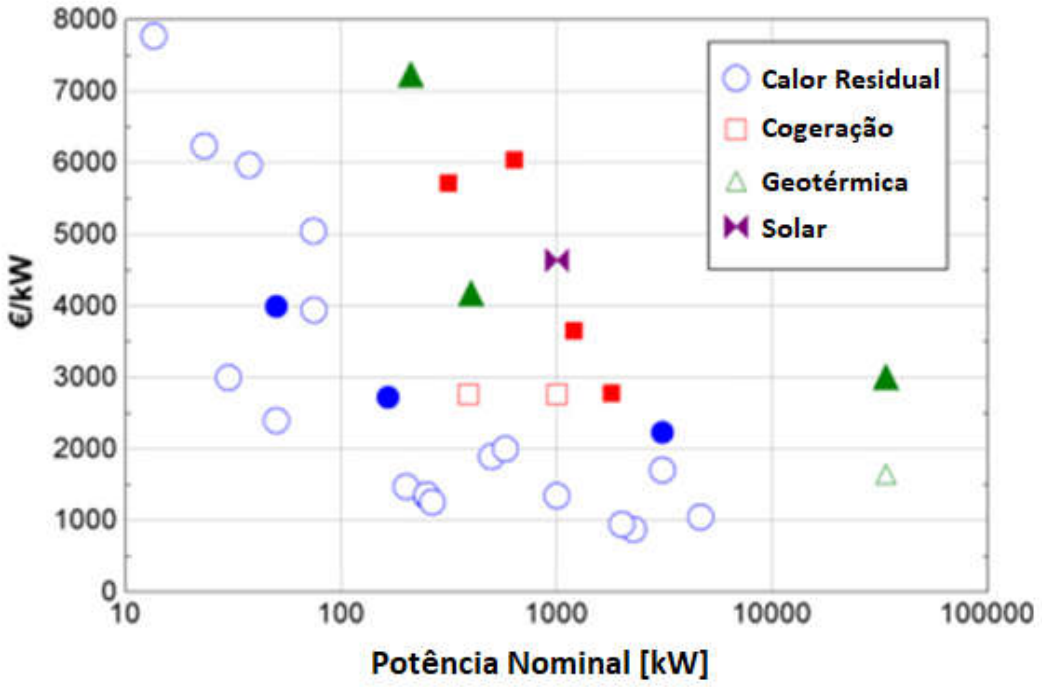


Figura 27 – Custo específico do módulo (símbolos sem preenchimento) e total (símbolos com preenchimento) de sistemas ORC em função da potência instalada.

Fonte: Adaptado de (QUOILIN, VAN DEN BROEK, *ET AL.*, 2013)

O custo total da instalação difere do custo do módulo ORC devido aos demais componentes da unidade, tais como caldeiras (no caso da biomassa), coletores solares

(aplicação solar), trocadores de calor (recuperação de calor), além de custos de engenharia, obras civis, integração de processos, etc. Em geral, o custo total do sistema pode ser de duas a três vezes superior ao custo do módulo ORC (H-REII, 2013)

Para aplicações de recuperação de calor, a fabricante Turboden apresenta os custos mostrados na Figura 28, variando entre 1900 a 1400 euros por kW instalados. Ademais, o fabricante cita que em aplicações de recuperação de calor residual de processos a composição de custos se dá conforme na Figura 29.

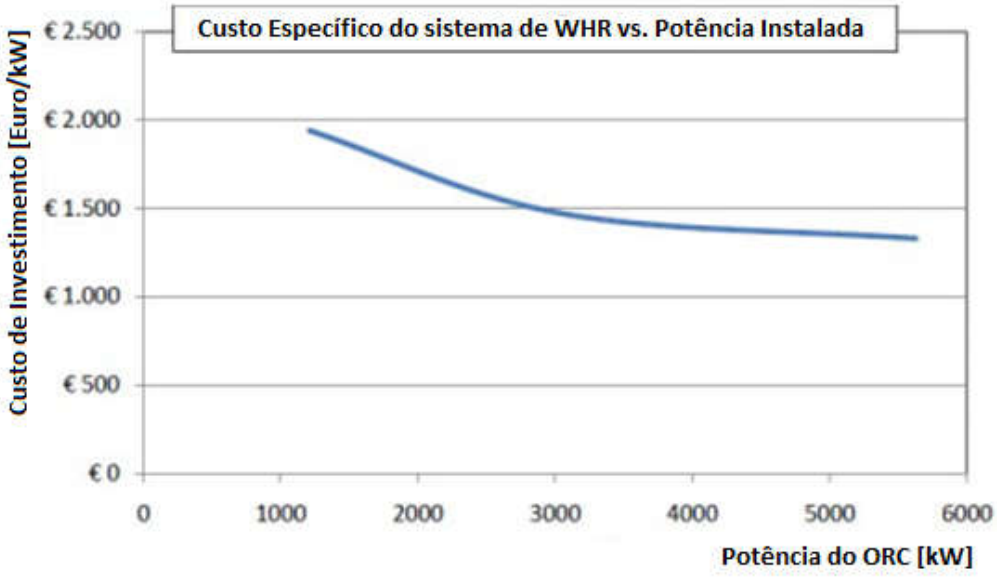


Figura 28 – Custos de Instalação apresentados pela Turboden.

Fonte: (TURBODEN, 2013)

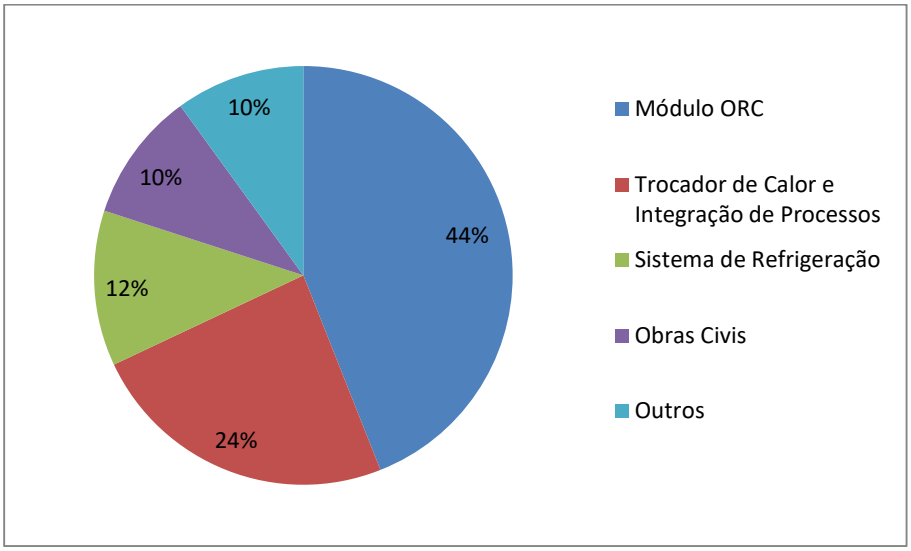


Figura 29 – Distribuição de custos nas aplicações de recuperação de calor residual.

Fonte: (PRATT & WHITNEY POWER SYSTEMS ORC SOLUTIONS, 2015)

No estudo da identificação do potencial de recuperação de calor nos Estados Unidos, é feita uma comparação entre os custos médios dos ORCs e dos sistemas Rankine a vapor convencionais, mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparações de CAPEX e OPEX de ORC e Ciclos Vapor.

Tecnologia	Tipo de Custo	Potência Instalada				
		50 a 500 kW	500 a 1000 kW	1 a 5 MW	5 a 20 MW	Acima de 20 MW
Ciclo Rankine Vapor	CAPEX [US$/kW]	3000	2500	1800	1500	1200
ORC	CAPEX [US$/kW]	4500	4000	3000	2500	2100

Fonte: (IFC, 2015)

Os custos anuais de operação e manutenção (O&M) consistem nas despesas associadas ao funcionamento da unidade, estando relacionados às despesas de mão de obra, aquisição de produtos químicos, reposição de peças, etc.

Segundo o fabricante ORMAT, em aplicações de recuperação de calor residual, o custo de O&M pode atingir valores extremamente baixos, de até 0,2 US$/MWh (LUKAWSKI, 2009). Enquanto o fabricante Turboden menciona custos típicos de operação de 5,0 US$/MWh (TURBODEN, 2014).

A composição dos custos de investimento e de manutenção é fundamental para o cálculo da viabilidade econômica do empreendimento. No estudo de FORNI, *et al.* (2012) existem quatro exemplos internacionais de recuperação de calor industrial via ORCs, onde o custo de investimento total varia entre 2,6 a 3,3 milhões de euros por MW instalado, com custos da eletricidade entre 70 e 80 euros por MWh, resultando em taxas internas de retorno entre 9% e 13% ao ano.

Em uma comparação para análise da viabilidade de ORCs, FORNI, *et al*., (2014).compararam quatro cenários:

1. Recuperação de calor de processo industrial para venda de calor como aquecimento distrital na região: nenhum investimento em ORCs ou receitas da eletricidade;
2. Recuperação de calor de processo industrial para venda de calor como aquecimento distrital durante o inverno e geração de eletricidade via ORCs durante o verão;
3. Recuperação de calor de processo industrial para cogeração em um sistema ORC, produzindo eletricidade de calor (em menores temperaturas), mas reduzindo a eficiência de conversão elétrica do sistema;
4. Recuperação de calor de processo industrial para produção apenas de eletricidade via sistema ORC.

Em todos os cenários, foi considerada uma fonte térmica com energia equivalente a 15 MWth, e 6.800 horas de operação anual. Foi considerado que 50% da energia térmica da fonte poderia ser direcionada para o aquecimento distrital, gerando 51 GWh/ano de calor útil. A Tabela 10 mostra os parâmetros utilizados para a comparação entre os cenários propostos por FORNI, *et al.,* (2014).

Tabela 10 – Parâmetros de Entrada para o estudo de Caso

Parâmetro	Aquecimento Apenas	Aquecimento no Inverno ORC no Verão	*Combined Heat and Power*	ORC Apenas	Unidade
Potência Térmica disponível na Fonte Quente	15	15	15	15	MW
Horas de operação anual	6800	6800	6800	6800	horas
Potencial de Energia na Fonte Quente	102000	102000	102000	102000	MWh/ano
Demanda de Aquecimento	50%	50%	50%	0%	-
Energia disponível para Produção de Eletricidade	51000	51000	102000	102000	MWh/ano
Eficiência do ORC	0%	19%	16%	19%	-
Potência Elétrica Gerada	0	2,85	2,4	2,85	MW
Energia Elétrica Produzida	0	9690	16320	19380	MWh/ano
Preço da Eletricidade	70	70	70	70	€/MWh
Receitas da Eletricidade	0,00	0,68	1,14	1,36	M €/ano
Energia Térmica para Venda	51000	51000	42840	0	MWh/ano
Preço da Energia Térmica	20	20	20	20	€/MWh
Receitas da Energia Térmica	1,02	1,02	0,86	0	M €/ano
Receita Total	1,02	1,70	2,00	1,36	M €/ano

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

Os custos de investimento e operação considerados para os quatro cenários são apresentados na Tabela 11, sendo consideradas também as seguintes informações FORNI, *et al*., (2014).

- Custo do sistema de recuperação de calor: 7 M €;
- Custo da conexão para aquecimento distrital: 1 M €;
- Custo do Módulo ORC: 2,4 M €;
- Custo dos sistemas Auxiliares: 5% do Investimento Total
- Taxa de Desconto de 6%

Tabela 11 – Comparativo dos resultados da Análise de Viabilidade.

Parâmetro	Aquecimento Apenas	Aquecimento no Inverno ORC no Verão	*Combined Heat and Power*	ORC Apenas	Unidade
Investimento Total	8,5	10,9	10,9	9,9	M €
O&M anual	0,1	0,15	0,15	0,12	M € / ano
Fluxo de Caixa Anual	0,92	1,55	1,85	1,24	M € / ano
Tempo de *Payback* Descontado	13,6	9,4	7,5	11,2	anos
Valor Presente em 15 anos	1,6	5,8	9,1	3,5	M €
Taxa Interna de Retorno	8,40%	12,50%	15,70%	10,40%	-
Redução das Emissões de CO_2	11477	11477	11477	11477	t/ano

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

1.6 – Análise Exergética

No presente trabalho o conceito de exergia será utilizado para verificar os potenciais e eficiências dos ciclos ORC em aplicações de recuperação de calor na indústria brasileira. Tal análise será realizada ao nível de estudo de caso de plantas industriais específicas. Trata-se de um caráter original deste estudo, diante da ainda reduzida aplicação do conceito no Brasil para análise de sistemas ORCs para recuperação de calor residual.

De maneira a compreender o conceito de exergia deve-se ter em mente alguns outros conceitos associados a essa função termodinâmica, como ambiente de referência, estado ambiente, destruição de exergia e estado morto (ROSEN, 1999).

Entende-se por ambiente de referência a idealização do ambiente natural caracterizado pelo estado de equilíbrio perfeito, isto é, a ausência de qualquer gradiente ou diferenças de pressão, temperatura, energia cinética e energia potencial. O estado de um sistema é chamado de estado ambiente quando o sistema está em equilíbrio térmico e mecânico com o ambiente de referência.

O estado morto consiste num estado onde o sistema está em equilíbrio térmico, mecânico e químico com o ambiente de referência conceitual (suas propriedades

intensivas, pressão, temperatura e potencial químico para cada uma das substâncias de referência estão em seus respectivos estados mortos). Nessa condição o sistema não pode realizar nenhuma alteração em seu estado através de interações com o ambiente.

A exergia pode ser consumida ou destruída durante um processo devido a irreversibilidades dentro dos limites do sistema, sendo esse processo denominado destruição de exergia.

Qualquer falta de equilíbrio estável mútuo entre um sistema e o ambiente pode ser utilizada para a produção de trabalho. A definição de exergia proposta por RANT (1956) é dita como o máximo trabalho que pode ser produzido na composição do sistema e seu ambiente de referência específico, ou como o trabalho mínimo necessário para realizar o processo inverso.

Uma segunda versão desta definição, muito conveniente, proposta por Szargut, é formulada como:

"Exergia é o trabalho de eixo ou elétrico necessário para se levar um material em um determinado estado a seu ambiente natural, de maneira reversível, sendo o calor trocado apenas com o ambiente" (SZARGUT, 1993).

Assim, a exergia não é simplesmente uma função termodinâmica, mas sim a função que correlaciona o sistema com seu ambiente de referência.

A exergia, por definição, é conservada apenas quando todos os processos ocorrendo no sistema e no ambiente são reversíveis: sempre que um processo irreversível ocorre alguma parcela de exergia é destruída. A eficiência exergética de um processo é a medida do quanto esse processo se aproxima do ideal (processo reversível).

Assim, pode-se classificar a exergia quanto à sua natureza. A exergia física é igual à máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando um sistema é trazido de seu estado inicial para o estado de referência através de processos físicos, que envolvem apenas interações térmicas e/ou mecânicas com o ambiente (KOTAS, 1985).

Exergia química é definida como a máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando a substância considerada é levada do estado ambiente ao estado morto

através de processos que envolvam transferência de calor e troca de substâncias apenas com o ambiente (KOTAS, 1985).

A Figura 30 ilustra os conceitos de exergia descritos.

Figura 30 – Trocas de exergia em diferentes estados do sistema.

A exergia física pode ser expressa usando a definição já citada em conjunto com a Figura 31. Considere-se uma máquina térmica reversível trocando calor com o ambiente e produzindo trabalho a partir de um fluxo de entrada no estado termodinâmico definido pelas propriedades P1 e T1, e um fluxo de saída correspondente às condições do ambiente P0 e T0 (KOTAS, 1985):

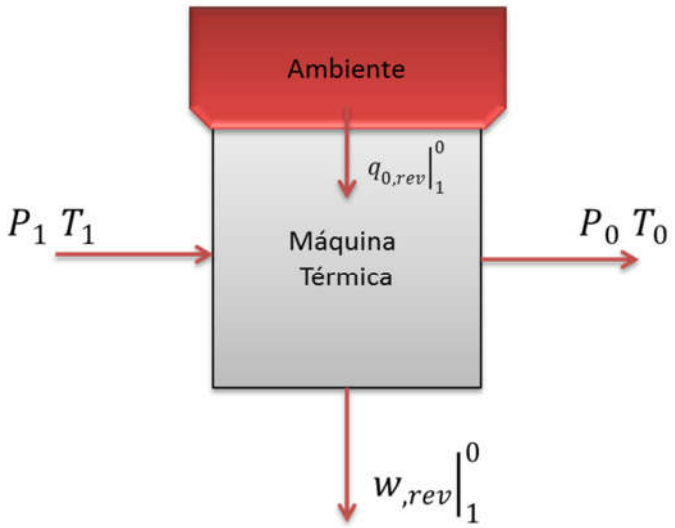


Figura 31 – Esquema de uma máquina térmica reversível.

Sendo a única interação possível com o ambiente a troca de calor reversível dada por:

$$q_{0,rev}\Big|_1^0 = T_0(s_0 - s_1) \tag{1}$$

Pelo balanço de energia em regime permanente obtém-se:

$$q_{0,rev}\Big|_1^0 - w_{,rev}\Big|_1^0 = (h_0 - h_1) \tag{2}$$

Como a exergia física é definida pela máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando um sistema é levado de um estado inicial até o estado de referência, tem-se ao substituir (1) em (2):

$$ex_f = w_{,rev}\Big|_1^0 = (h_1 - T_0 s_1) - (h_0 - T_0 s_0) \tag{3}$$

A exergia química, determinada como o máximo de trabalho que pode ser realizado quando um sistema é levado do estado ambiente até o estado morto, através da troca de substâncias e de calor com o meio (KOTAS, 1985), pode ser obtida como o fluxo de exergia no estado ambiente:

$$ex_q = \sum N_{io}(\mu_{io} - \mu_i^o) \tag{4}$$

Onde N_{io} é o número de mols, μ_{io} os potenciais químicos das espécies 'i' no estado ambiente e μ_i^o os potenciais químicos das espécies 'i' no estado morto.

Portanto, a análise exergética de processos permite a minimização da irreversibilidade interna e das perdas para o ambiente (irreversibilidade externa). Enquanto a Primeira Lei da Termodinâmica lida com quantidades de energia, a Análise Exergética considera a qualidade e a quantidade da mesma, permitindo a identificação de potenciais para a realização de trabalho. Essa metodologia identifica com maior precisão as ineficiências dos processos termodinâmicos, fornecendo dados quantitativos tanto da qualidade quanto da quantidade da energia.

Assim, a análise exergética é uma ferramenta importante para o estudo, sendo capaz de revelar e dimensionar o potencial de aumento da eficiência energética dos sistemas através da redução de perdas. É uma técnica adequada para promover o uso da energia de maneira mais eficiente, pois permite que os locais, tipos e magnitudes dos resíduos e perdas sejam identificados (DINCER, 1998).

Em SHAEFFER e WIRTHSHAFTER (1992) a análise exergética é aplicada à economia brasileira, sendo utilizada como uma ferramenta para o planejamento energético. Os autores revelam resultados significativos, demonstrando que, de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, a eficiência energética brasileira é de 32%, enquanto a eficiência exergética (estimada conforme a Segunda Lei da Termodinâmica) atinge apenas cerca de 23%. Esses dados mostram que a eficiência exergética com que o Brasil converte seus recursos é dois terços daquela calculada pelo balanço tradicional, feito em base entálpica; eles revelam a necessidade do aumento da eficiência nos processos de conversão e utilização de energia do país e indicam ser necessária uma análise detalhada das fontes de irreversibilidade nos processos industriais brasileiros.

Ademais, segundo BEJAN (2002), ao analisar as perdas associadas à irreversibilidade, a análise exergética se apresenta como a única metodologia adequada para avaliar o potencial de recuperação de calor residual em instalações industriais. Por exemplo, a Figura 32 mostra um exemplo de comparação entre a energia e a exergia em alguns pontos de rejeito de calor na indústria siderúrgica.

Essa ferramenta vem sido constantemente utilizada para medir a viabilidade de recuperação de calor em diversas aplicações como a recuperação de calor nas indústrias de cimento, vidro e siderurgia (LONG, BAO, *et al.*, 2014); em plataformas de extração de petróleo acopladas a turbinas a gás (WALNUM, *et al.,* 2013).

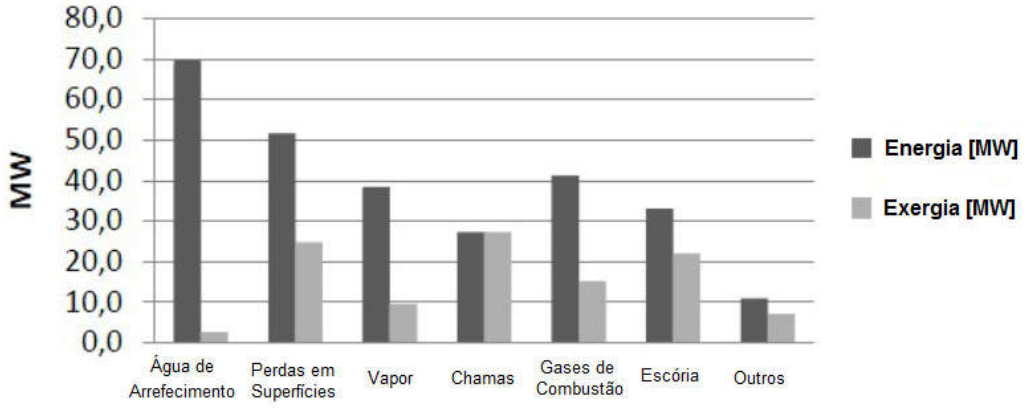


Figura 32 - Comparação entre Energia e Exergia em pontos específicos de uma siderúrgica.

Fonte: (MALMSTROM, 2009)**.**

No estudo de MALMSTROM (2009) o potencial de recuperação de calor de uma usina siderúrgica com produção anual de 2,3 milhões de toneladas anuais foi analisado. A autor identificou através do balanço exergético um potencial teórico para produção eletricidade de 100 MW. Por razões óbvias, a viabilidade da instalação dos sistemas de recuperação deve ser também deve ser analisada de forma a não comprometer a produção de aço.

O artigo de KARELLAS (2012) analisa o potencial de energia aproveitável nos rejeitos térmicos da indústria de cimento, identificando que o processo de produção de cimento é caracterizado por grandes perdas energéticas, cerca de 40% da entrada térmica, principalmente nos gases de exaustão do forno (*kiln*) na produção de clínquer.

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA

2.1 – Introdução

Apesar de já se apresentarem como uma tecnologia consolidada no mercado, os Ciclos Rankine Orgânicos, em todas suas formas de aplicação, não possuem nenhuma unidade em aplicação comercial no Brasil. O objetivo fundamental desse estudo é verificar sua possível aplicação da recuperação de calor residual de processos industriais.

Logo, visando analisar o potencial de produção de energia de em instalações industriais via ORC no Brasil esta tese fez uso da metodologia descrita a seguir:

1) Mapeamento Inicial do Potencial

A partir da revisão bibliográfica e das análises de estudos de caso internacionais, observou-se que um conjunto de segmentos industriais possui maior "aptidão" para a penetração de ORCs devido às características de seus processos produtivos, são eles os setores de Cimento e Vidro (HREII, 2013). Ademais, verifica-se também que outros setores energo-intensivos como a Siderurgia (H-REII, 2012) e Alumínio (WANG, *et al.*, 2012) também podem apresentar características adequadas para o uso de ciclos Rankine orgânicos.

O setor Químico também foi analisado devido à sua grande representatividade na indústria brasileira. Entretanto, sua grande diversidade de produtos e processos faz com que a análise desse setor seja mais complexa, conforme tratado posteriormente.

Finalmente, optou-se por estudar também o setor de cerâmica, que mesmo sendo composto por unidades industriais de pequeno porte, é também caraterizado pelo uso de lenha como combustível em formos podendo, assim, apresentar disponibilidade de madeira na localidade. Portanto, o uso de um sistema que utiliza a combinação de calor de processo e biomassa poderia ser utilizado.

Assim, foram selecionados os subsetores que serão analisados em maiores detalhes no Capítulo 3.

2) Seleção de Casos de Estudos Reais para Análise Técnico-Econômica

A partir da seleção dos setores descrita anteriormente, deu-se início a uma prospecção de campo para identificação de potenciais unidades fabris interessadas em fazer uso dos sistemas ORC para geração de potência elétrica a partir de calor de rejeito.

Foram selecionadas seis fábricas, uma para cada setor industrial estudado, e realizadas visitas técnicas para obtenção de dados de operação e apresentação de tecnologia ORC. Dessa forma, o presente estudo contou com dados reais de operação das unidades industriais, coletados diretamente em campo ou fornecidos pela equipe de engenharia do local.

De forma a analisar a capacidade de geração dos ORCs, foi desenvolvido um modelo matemático para o cálculo termodinâmico da unidade (detalhado nos itens 2.2, 2.3 e 2.4 deste capítulo) e análise do desempenho dos pontos de vista energético e exergético. Sendo realizadas interações com um fabricante da tecnologia (Turboden s.r.l.) para obtenção de maiores detalhes das características operativas das máquinas comercializadas, verificando-se assim a viabilidade técnica do empreendimento.

Para o estudo de viabilidade econômica, foi desenvolvido um segundo modelo com viés econômico, responsável por receber os resultados básicos da análise técnica e implementar as premissas financeiras adotadas e, assim, calcular o desempenho econômico de cada caso analisado.

Os estudos de caso são apresentados no Capítulo 4.

3) Extrapolação dos Resultados para a Escala Nacional

Finalmente, após a realização dos estudos de caso mencionados, partiu-se para a extrapolação dos resultados para cada subsetor industrial[4], de maneira a estimar os resultados gerados pela replicação dos sistemas ORC no restante de cada setor industrial.

---

[4] O setor de cerâmica não é analisado nessa extrapolação, uma vez que a relação entre a produção industrial e potência gerada pelo ORC seria deturpada pela geração proveniente da biomassa, assim optou-se apenas por manter o estudo de caso devido às características especiais do sistema híbrido proposto.

Outros setores da indústria como Papel e Celulose, produção de outros Metais Não-Ferrosos, e principalmente o setor de Óleo e Gas devido ao "fechamento de ciclos" em unidades de compressão de gás, também foram identificados com potenciais interessantes para recuperação de calor. Porém, tais setores não foram abordados nesse estudo, devido à escassez de infomação gerada pela falta de acesso a unidades em operação.

A Figura 33 resume o procedimento metodológico empregado no estudo.

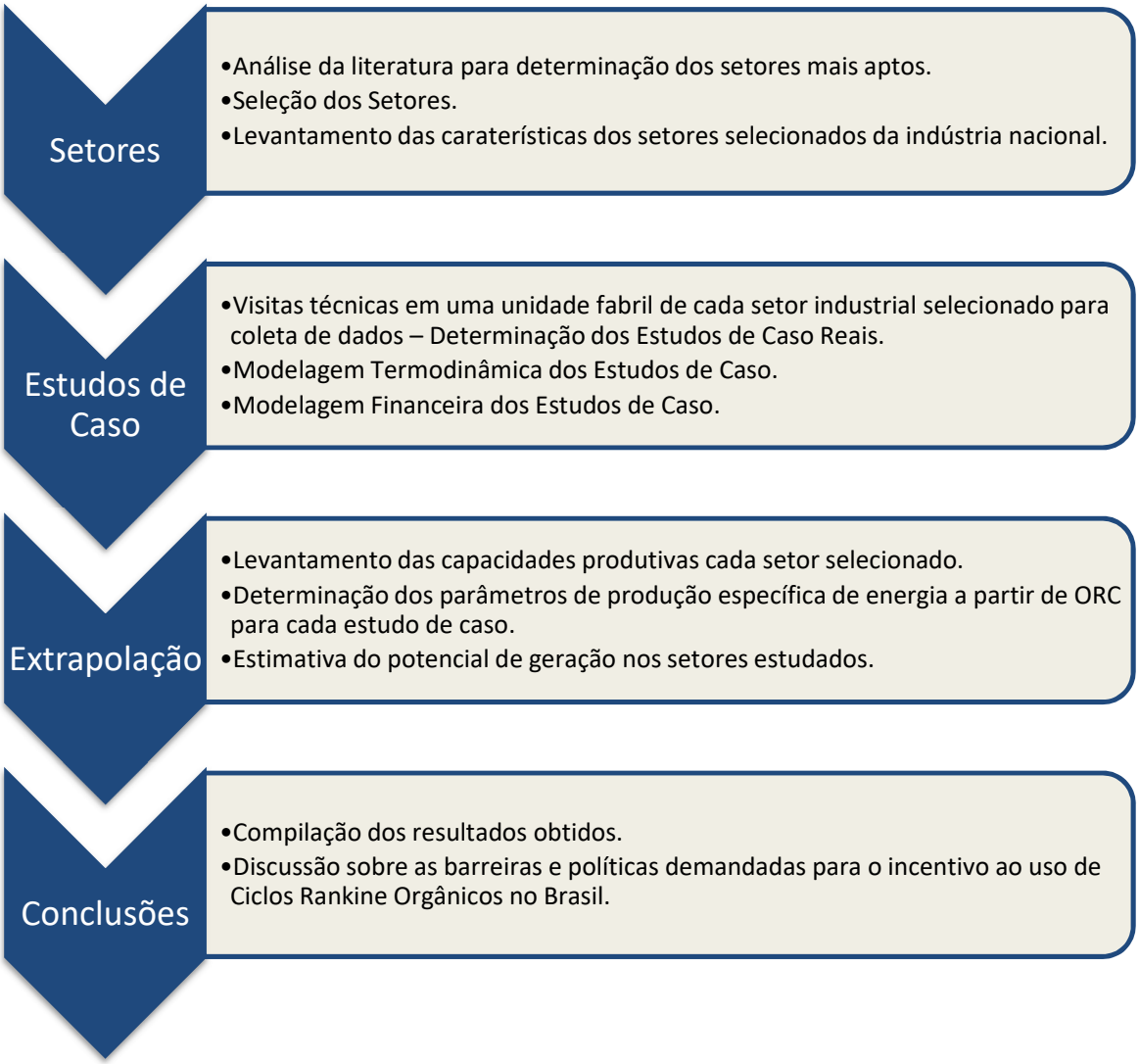


Figura 33 – Fluxograma explicativo da metodologia do estudo.

2.2 – Ciclo de Potência

De maneira a equacionar os ORCs para a realização dos cálculos termodinâmicos de análise de desempenho, foi selecionada a configuração apresentada na Figura 34, de um ciclo com regenerador após a expansão na turbina. A seleção de um ciclo com regenerador se deu em virtude dessa configuração ser tipicamente adotada pelos fabricantes de ORCs (TCHANCHE, 2010).

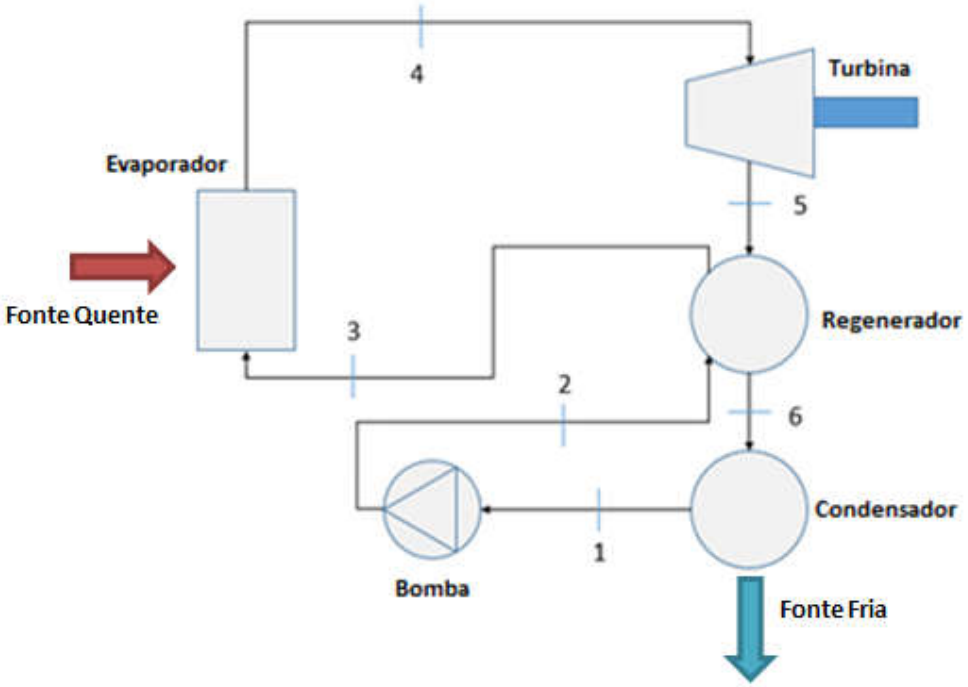


Figura 34 - Ciclo ORC e a Denominação dos estados termodinâmicos para a modelagem matemática.

A numeração proposta na Figura 34 é utilizada para nomear os estados termodinâmicos do ciclo, permitindo a realização da modelagem descrida nas próximas seções desse capítulo. A "Fonte Quente" é responsável por fornecer o calor ao ciclo de potência, sendo suas condições de temperatura e vazão conhecidas (função do processo industrial), enquanto a "Fonte Fria" (água) está associada ao sistema de refrigeração do ciclo.

2.3 – Análise via Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira etapa no equacionamento termodinâmico do ciclo ORC consiste na determinação no ponto 1, que será o ponto de partida da modelagem. Dessa forma considera-se que, no ponto 1, são conhecidas as condições de temperatura (T) e pressão (P), estando o estado termodinâmico definido. Fazendo uso das funções termodinâmicas do REFPROP[5] é possível determinar a entropia e entalpia desse ponto. Logo,

$$P_1 = entrada \tag{5}$$

$$T_1 = entrada \tag{6}$$

$$h_1 = enthalpy\ (P_1, T_1, fluido) \tag{7}$$

$$s_1 = entropy\ (P_1, T_1, fluido) \tag{8}$$

$$v_1 = volume\ (P_1, T_1, fluido) \tag{9}$$

Considerando uma variação de pressão (PR – *pressure ratio*) pré-determinada nas bombas, isto é, um dado de entrada, tem-se que a pressão após o bombeamento (ponto 2) será equivalente a:

$$p_2 = p_1 . PR_p \tag{10}$$

[5] O software comercial REFPROP foi desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology), sendo um acrônimo para "REFERENCE fluids PROPERTIES". O programa calcula as propriedades termodinâmicas e de transporte de fluidos industrialmente importantes e suas misturas. Essas propriedades podem ser exibidas em tabelas e gráficos por meio da interface gráfica do usuário; eles também são acessíveis através de planilhas ou aplicativos programados pelo usuário acessando a DLL REFPROP, as sub-rotinas das propriedades em FORTRAN, ou a integração com EXCEL via VBA.

Fazendo uso da eficiência isentrópica da bomba (η_p), um outro parâmetro de entrada, pode-se estimar o trabalho demandado processo de bombeamento 1-2:

$$\dot{W}_P = \dot{m}_f \frac{v_1 (p_2 - p_1)}{\eta_p} \tag{11}$$

Onde v_1 é o volume específico determinado no ponto 1 [m3/kg]. Fazendo uso do trabalho da bomba é possível determinar a entalpia do ponto 2.

$$h_2 = h_1 + W_P \tag{12}$$

Assim, a partir da pressão e entalpia no ponto 2 é possível determinar as demais propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho:

$$s_2 = entropy\ (P_2, T_2, fluido) \tag{13}$$

Para a determinação do ponto 3, considera-se uma queda de pressão percentual no regenerador, equivalente a $\Delta p_{2,3}$.

$$p_3 = p_2 .(1 - \Delta p_{2,3}) \tag{14}$$

Além da pressão, deve-se conhecer outra variável para determinar o estado termodinâmico em 3. Assim, definiu-se que a temperatura no ponto 3 seria dada pela temperatura de vaporização do fluido de trabalho na pressão p_3 subtraído de um delta de resfriamento:

$$T_3 = T_{liquid} - \Delta T_{regen} \tag{15}$$

Logo, a entalpia no etado termodinâmico 3 pode ser definida definida,

$$h_3 = enthalpy\ (P_3, T_3, fluido) \tag{16}$$

Consequentemente, a variação de entalpia do fluido de trabalho pode ser calculada,

$$\Delta h_{regen} = (h_3 - h_2) \tag{17}$$

Para o determinar do calor trocado pelo regenerador, tem-se:

$$\dot{Q}_{regen} = \dot{m}_f \frac{\Delta h_{regen}}{f_{regen}} \tag{18}$$

Sendo f_{regen} a perda de calor para o ambiente do trocador de calor, considerada nessa modelagem como uma entrada, um valor entre 0 e 1.

O ponto 4, localizado após o evaporador pode ter sua pressão calculado de maneira semelhante ao ponto 3:

$$p_4 = p_3.(1 - \Delta p_{3,4}) \tag{19}$$

Onde o parâmetro $\Delta p_{3,4}$ representa a queda de pressão percentual no trocador de calor.

Posteriormente, para determinação da entalpia em 4, deve-se fazer uso do calor externo fornecido pela fonte quente:

$$\dot{Q}_{inlet} = \dot{m}_{gas}.(h_{gin} - h_{gout}) \tag{20}$$

Onde $\dot{m}_{gas}$ é a vazão dos gases quentes [kg/s], h_{gin} é a entalpia inicial da fonte quente (antes do trocador de calor) e h_{gout}a entalpia na saída do trocador de calor. Porém, ao considerar as perdas associadas ao trocador de calor (f_{evap}), tem-se que o calor realmente fornecido ao ciclo é dado por:

$$\dot{Q}_{inlet} = \dot{Q}_{evap}.f_{evap} \tag{21}$$

E,

$$\Delta h_{evap} = \dot{Q}_{inlet} / \dot{m}_f \tag{22}$$

Assim, pode-se calcular a entalpia na saída do evaporador:

$$h_4 = h_3 + \Delta h_{evap} \tag{23}$$

Com a entalpia e a pressão definidas, as demais propriedades termodinâmicas são calculadas.

$$T_4 = temperatur \quad e(P_4, h_4, fluido) \tag{24}$$

$$s_4 = entropy \quad (P_4, T_4, fluido) \tag{25}$$

Para a definição do ponto 5, após a expansão na turbina, um valor de eficiência isentrópica deve ser considerado para o cálculo da entalpia:

$$h_5 = h_4 - \eta.(h_4 - h_{5s}) \tag{26}$$

Sendo h_{5s} a entalpia isentrópica no ponto 5, calculada a partir das seguintes equações:

$$s_{5s} = s_4 \tag{27}$$

$$P_5 = \frac{P_1}{f_{cond}} \tag{28}$$

$$h_{5s} = enthalpy \quad (P_5, s_{5s}, fluido) \tag{29}$$

Onde f_{cond} é a queda de pressão no condensador, dessa forma considerou-se que não existe perda de carga no regenerador.

Ou seja:

$$P_5 = P_6 = \frac{P_1}{f_{cond}} \tag{30}$$

Uma vez determinada a entalpia e a pressão no ponto 5, o estado termodinâmico está definido, sendo as demais propriedades facilmente determinadas:

$$T_5 = temperatur\ \ e(P_5, h_5, fluido) \tag{31}$$

Para o cálculo do estado termodinâmico no ponto 6, após o regenerador, faz-se uso da pressão P_6 e do calor transferido $\dot{Q}_{regen}$. Logo,

$$h_6 = h_5 - \dot{Q}_{regen} / \dot{m}_f \tag{32}$$

Posteriormente, a temperatura após o regenerador pode ser calculada como:

$$T_6 = temperatur\ \ e(P_6, h_6, fluido) \tag{33}$$

Finalmente, a potência gerada pela expansão do fluido de trabalho na turbina pode ser calculada:

$$\dot{W}_t = \dot{m}.(h_4 - h_5) \tag{34}$$

Sendo assim possível determinar a eficiência de primeira lei do ciclo:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_p}{\dot{Q}_{inlet}} \tag{35}$$

2.4 – Análise via Segunda Lei da Termodinâmica

Para a realização da análise exergética do sistema, deve-se determinar a exergia de cada estado termodinâmico. Para isso, faz-se uso da equação:

$$i = h - h_0 - T_0(s - s_0) \tag{36}$$

Onde *i* é a exergia, *h* a entalpia e *s* é a entropia em cada ponto sob análise.

Sendo o termo, h_0 a entalpia do "estado ambiente" e s_0 a entropia do "estado ambiente".

Uma vez calculada a exergia de cada ponto do ciclo em análise, a destruição exergética de cada processo pode ser determinada através das seguintes equações:

Evaporador: Lado do Fluido de Trabalho

$$\Delta i_{evap,f} = T_0(\dot{m}_f(s_4 - s_3)) \tag{37}$$

Evaporador: Lado do Fluido de Aquecimento

$$\Delta i_{evap,g} = T_0(\dot{m}_{gas}(s_{gout} - s_{gin})) \tag{38}$$

Destruição exergética no Evaporador:

$$\Delta i_{evap} = \Delta i_{evap,f} + \Delta i_{evap,g} \tag{39}$$

Regenerador: Lado do Fluido de Frio

$$\Delta i_{regen,cold} = T_0(\dot{m}_f(s_3 - s_2)) \tag{40}$$

Regenerador: Lado do Fluido Quente

$$\Delta i_{regen,hot} = T_0(\dot{m}_f(s_6 - s_5)) \tag{41}$$

Destruição exergética no Regenerador:

$$\Delta i_{regen} = \Delta i_{regen,hot} + \Delta i_{regen,cold} \tag{42}$$

Condensador: Lado do Fluido de Trabalho

$$\Delta i_{cond,f} = T_0(\dot{m}_f(s_1 - s_6)) \tag{43}$$

Condensador: Lado da Água:

$$\Delta i_{cond,w} = T_0(\dot{m}_w(s_{w,out} - s_{w,in})) \tag{44}$$

Destruição exergética no condensador

$$\Delta i_{cond} = \Delta i_{cond,f} + \Delta i_{cond,w} \tag{45}$$

Destruição exergética na Turbina:

$$\Delta i_t = T_0(\dot{m}_f(s_4 - s_3)) \tag{46}$$

Para o cálculo da exergia que entra no ciclo ORC, faz-se o uso da seguinte equação:

$$i_{inlet} = \dot{m}_{gas}(h_{gin} - h_0) - T_0(s_{gin} - s_0)) \tag{47}$$

Assim, a eficiência exergética do sistema ORC pode ser calculada como:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{i_{inlet}} \tag{48}$$

A eficiência exergética interna indica a eficiência exergética do fluido de trabalho, determinada pelas eficiências dos equipamentos, temperaturas de operação e propriedades termo-físicas do fluido.

Dessa maneira, a exergia da fonte quente na saída do evaporador é tratada como perda exergética. Comparado com as maneiras tradicionais de cálculo da eficiência exergética, essa tese segue a estratégia proposta por LONG, BAO, *et al.* (2014), onde o input exergético é caracterizado como custo do sistema. Para uma mesma fonte de calor, as características da transferência de calor são diferentes devido às propriedades dos diferentes fluidos de trabalho, sendo a condição de saída do evaporador também diferente.

Logo a eficiência exergética interna dada por:

$$\eta_{ex,i} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\Delta i_{evap,g}} \tag{50}$$

Enquanto a eficiência exergética externa pode ser determinada por:

$$\eta_{ex,e} = \frac{\Delta i_{evap,g}}{i_{inlet}} \tag{51}$$

Logo, analisar a eficiência exergética interna é uma estratégia interessante para estabelecer o desempenho do ciclo e seu fluido de trabalho.

A eficiência exergética externa indica a razão de exergia transferida para o fluido de trabalho na fonte quente. Quando as condições da fonte quente são entradas conhecidas, ela depende basicamente das características do processo transferência de energia no trocador de calor (evaporador). Nesse estudo será dada ênfase à eficiência exergética externa, uma vez que esse parâmetro é capaz de indicar os níveis de degradação da qualidade da fonte quente dos sistemas de recuperação de calor.

2.5 – Análise Econômica de ORCs

Além da verificação do potencial técnico de geração de eletricidade fazendo uso do calor disponível na fonte quente, é fundamental verificar a viabilidade econômica do empreendimento. Para tal, nessa tese foi estruturado um modelo financeiro visando analisar o retorno do investimento dos sistemas ORC.

Para todos os casos analisados, foram criados três cenários econômicos:

- Otimista: Cenário que considera os custos de CAPEX e O&M mais baixos e poucas paradas para manutenção da unidade geradora
- Pessimista: Considera custos de CAPEX e O&M mais elevados e maiores paradas para manutenção da unidade geradora
- Médio / Intermediário: Cenário intermediário entre os cenários Otimista e o Pessimista

O objetivo desses cenários é mostrar a variação dos resultados econômicos e função de variações no custo de investimento (CAPEX) e custos de operação e manutenção (O&M), e no fator de capacidade da usina (disponibilidade).

Os custos de investimento para a geração via ORC foram divididos nos seguintes itens, baseados no estudo de ALVES, *et al.* (2012):

i. Módulo ORC
ii. Estruturais
iii. Instalação
iv. Transporte e Importação

Os custos do item “Módulo ORC” contemplam os equipamentos principais para o ciclo Rankine Orgânico, entre eles:

- Módulo contendo a máquina ORC;
- Trocadores de calor para recuperação de calor da fonte quente e demais componentes de transporte do calor até o evaporador do ORC;
- Equipamentos auxiliares e refrigeração, associados à dissipação do calor no condensador e demais elementos.

Os custos “Estruturais” envolvem os seguintes elementos:

- Engenharia básica, associado ao desenvolvimento do projeto;
- Projeto executivo e obras civis, elaboração do projeto executivo e custos das obras.

Os investimentos da “Instalação” também devem ser considerados, estando subdivididos em:

- Instalação dos equipamentos;
- Conexão à rede.

Onde a conexão à rede pode ter algumas facilidades em unidades industriais devido à infraestrutura preexistente no local.

Ademais, os custos de importação e transporte devem ser contabilizados em projetos no Brasil:

- Transporte marítimo;
- Seguros;
- Serviços de importação.

A composição desses elementos fornece o Custo de Investimento Total (CAPEX) da unidade. Entretanto, como nenhum projeto de engenharia foi desenvolvido em detalhes,

os valores utilizados nesse trabalho estão sujeitos a incertezas e podem variar consideravelmente, corroborando a necessidade da existência de três cenários de análise. A Figura 35 mostra a composição dos custos típicos de ORCs.

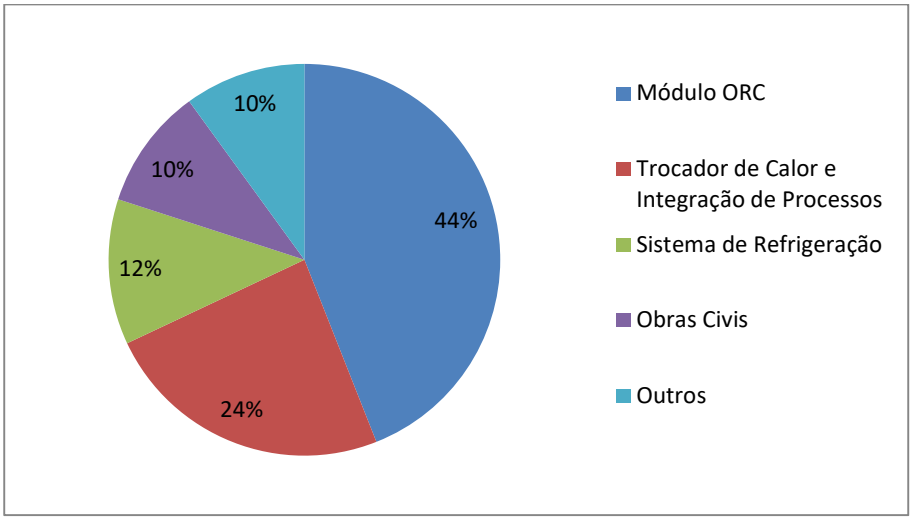


Figura 35 – Composição típica dos custos de instalação dos sistemas ORC.

Fonte: (TURBODEN, 2014)

Ademais, para análise de viabilidade econômica dos ORCs, devem-se considerar os custos de operação e manutenção. De acordo com as informações obtidas na revisão bibliográfica e através de contato estabelecido diretamente pela fabricante Turboden em H-REII (2014), os custos de O&M do sistema ORC são da ordem de 5 US$/MWh.

Por último, vale ressaltar que para aplicações de recuperação de calor para produção de potência, não existem custos associados à aquisição de combustível. Dessa maneira, a viabilidade econômica dos ORCs é altamente dependente do preço da eletricidade, valorada como redução da aquisição de eletricidade do *grid* nas fábricas.

CAPÍTULO 3 – A RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL PARA PRODUÇAO DE ELETRICIDADE NA INDÚSTRIA E AS CARACTERÍSTICAS DO SETOR INDUSTRIAL BRASILEIRO

3.1 – Introdução

A produção industrial é responsável por volumes consideráveis de rejeito de calor para o ambiente (DOE, 2008), e as indústrias energo-intensivas se encontram em constante competição internacional, expostas a variações de preços de energéticos e sujeitas a limitações ambientais cada vez mais severas. Assim, o aproveitamento ótimo da energia produzida por seus processos pode constituir uma oportunidade interessante para aumento da competitividade, bem como da sustentabilidade do setor.

A definição de calor de rejeito industrial pode ser feita a partir do conceito de "reserva de calor de rejeito" e "recursos de calor de rejeito", conforme mencionado por BENDING, *et al.*, (2012). A reserva de calor de rejeito é a exergia líquida que inevitavelmente deixa um processo, subtraída da exergia que não pode ser recuperada por questões técnicas ou econômicas. Enquanto o recurso de calor de rejeito é a exergia total que inevitavelmente deixa um processo, independentemente das opções tecnológicas adotadas no mesmo. Assim, o objetivo desse estudo é analisar o calor residual definido como reserva, isto é, aquele capaz de ser recuperado mediante a adoção de tecnologias técnico e economicamente viáveis.

O calor recuperado pode ser utilizado mediante às demandas do local (indústria), mas sempre priorizando o seu uso direto, ou seja, dentro do processo industrial, evitando dessa forma outras perdas de conversão. Entretanto, como o uso direto do calor recuperado nem sempre é viável, a conversão desse resíduo térmico em eletricidade pode ser a melhor opção de utilização.

O calor residual de processos industriais pode ser destinado para diversos usos, mas buscando obter a maior eficiência, WENG, *et al.*, (2013) apresentam um encaminhamento, conforme mostrado no fluxograma da Figura 36.

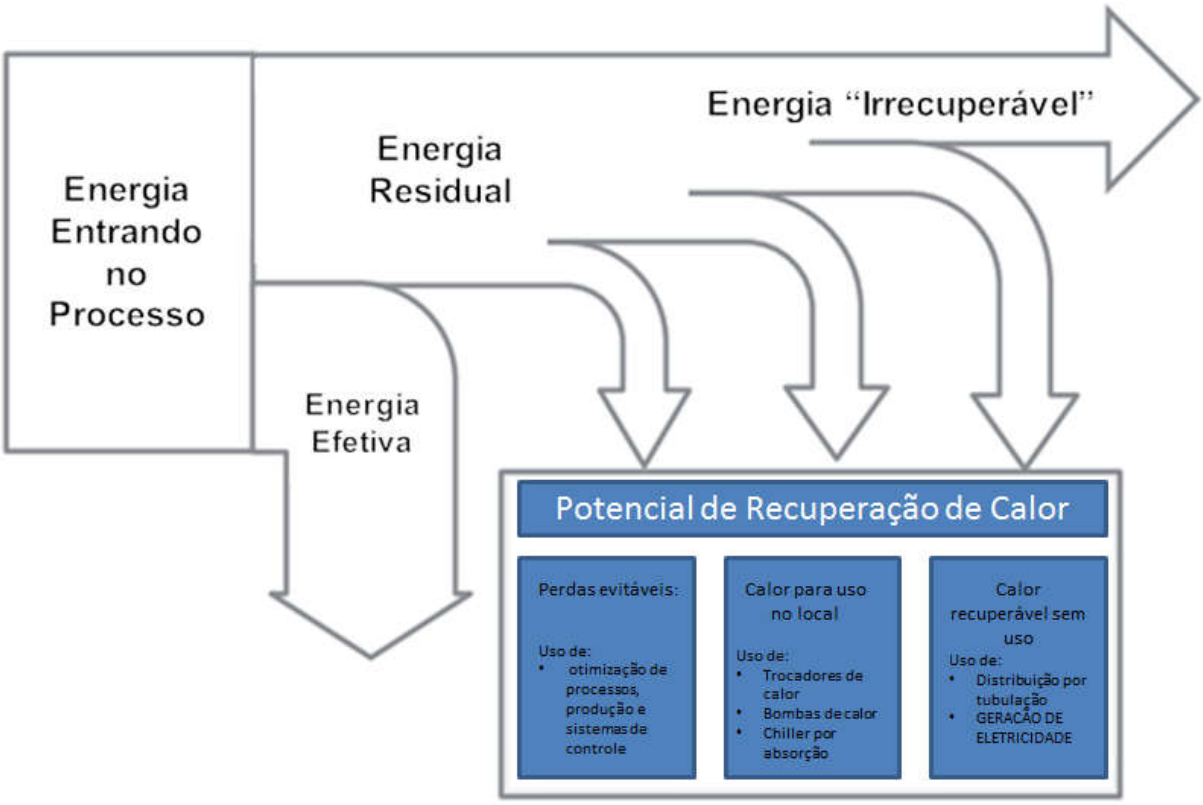


Figura 36 - Fluxograma Sankey dos processos de recuperação de calor.

Fonte: Baseado em (WENG, BORY E BERTHOU, 2013)

Da energia que alimenta o processo industrial, apenas uma parte é consumida e considerada como "Energia Efetiva". Da energia residual, deve-se priorizar a sua minimização através da redução das perdas evitáveis, através da eficientização do processo produtivo via otimização de sistemas de controle entre outras medidas.

Quando a otimização não é mais possível, o uso direto do calor de rejeito deve ser verificado, seja através de trocadores de calor, bombas de calor, armazenamento térmico ou sistemas de absorção para produção de frio. De maneira a ainda evitar maiores perdas exergéticas, deve-se considerar também o aproveitamento do calor em localidades adjacentes à indústria.

Caso o calor de rejeito ainda se mantenha inutilizado após as análises mencionadas, a viabilidade de sua conversão em eletricidade deve ser analisada.

Dessa forma, a avaliação sobre o uso final dos rejeitos térmicos deve ser feita caso a caso, levando-se sempre em consideração os custos e preços, bem como as demandas de calor e eletricidade futuras. Portanto, para a priorização do uso do calor residual, FORNI, et al., (2014) propõem o seguinte diagrama de decisão:

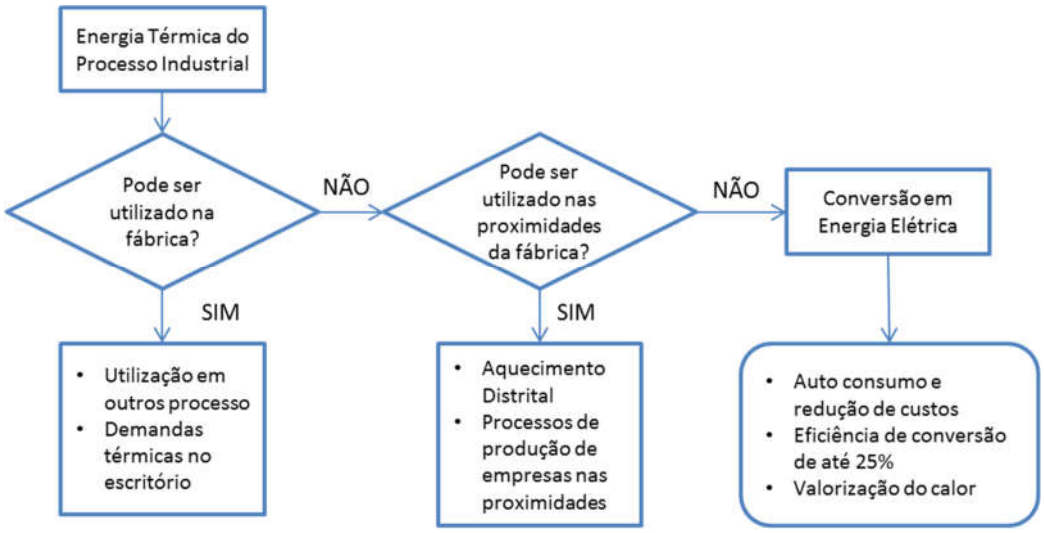


Figura 37 – Diagrama de decisão para sistemas de recuperação de calor industrial.

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

A experiência internacional mostra que, em diversas analises de otimização de processos industriais focados no uso de calor residual, em diferentes setores e em um número significativo de casos (BIANCHI e DE PASCALE, 2011), a produção de eletricidade é a aplicação mais recomendada, podendo inclusive ser a única opção, sob uma ótica técnico-econômica, para a recuperação da energia térmica disponível dos processos.

Logo, para a correta tomada de decisão sobre o uso da fonte térmica, deve-se ter em mente dois parâmetros fundamentais:

- Qualidade do Calor: Associada à facilidade de absorver o calor e à temperatura da fonte quente. Fontes com maiores temperaturas possuem maior qualidade, impactando diretamente na custo-efetividade do processo de recuperação de calor;
- Quantidade de Calor: parâmetro associado à energia total disponível na fonte quente, uma combinação da vazão e entalpia na saída do processo.

A Tabela 11 exemplifica algumas fontes de calor e a qualidade a elas associada.

Tabela 12 – Exemplos de fontes quentes para recuperação de calor em processos industriais e suas qualidades

Fonte	Qualidade
Gases de exaustão	Alta qualidade e grande potencial
Fluxos de vapor	Alta qualidade e grande potencial
Perdas de Calor convectivas e radiativas do exterior de equipamentos	Baixa qualidade, se resfriado pode ser usado como preaquecimento
Perdas de calor na água de resfriamento	Baixa qualidade
Calor armazenado em produtos de processos	Qualidade variável
Efluentes gasosos ou líquidos de processos	Baixa qualidade devido aos contaminantes normalmente presentes nesses fluidos

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

Em relação aos níveis de temperatura, pode-se classificar do rejeito térmico industrial de acordo com sua qualidade, ou seja, temperatura (entalpia) (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2010):

- Recuperação de Calor de Alta Temperatura – 650 ºC ou mais (Tabela 13)
- Recuperação de Calor de Média Temperatura – entre 230 e 650 ºC (Tabela 14)
- Recuperação de Calor de Baixa Temperatura – abaixo de 230 ºC (Tabela 15)

Tabela 13 - Exemplos de Fontes de Calor com Alta Temperatura

Fonte	Temperatura [ºC]
Forno de refino de níquel	1370 a 1650
Forno de refino de alumínio	650 a 760
Forno de Refino de zinco	760 a 1100
Forno de Refino de cobre	760 a 815
Forno de aquecimento de aço	925 a 1100
Fornos abertos (*Open Hearth Furnace*)	650 a 700
Forno (*Kiln*) de cimento (via seca)	620 a 730
Forno de fusão de vidro	1000 a 1550
Incineradores de resíduos sólidos	650 a 1000
Produção de Hidrogênio	650 a 1000

Fonte: (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2010)

Tabela 14 - Exemplos de Fontes de Calor com Média Temperatura

Fonte	Temperatura [ºC]
Exaustão de caldeiras a vapor	230 a 480
Exaustão de turbinas a Gás	370 a 540
Exaustão de geradores à combustão	315 a 600
Exaustão de geradores à combustão (turbo aspirados)	230 a 370
Fornos de secagem	230 a 600
Craqueadores catalíticos	425 a 650
Sistema de refrigeração de fornos de recozimento	425 a 650

Fonte: (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2010)

Tabela 15 - Exemplos de Fontes de Calor com Baixa Temperatura

Fonte	Temperatura [ºC]
Vapor condensado de processos	55 a 88
Água de resfriamento de	
Mancais	32 a 88
Máquinas de solda	32 a 88
Compressores de ar	27 a 50
Bombas	27 a 88
Condensadores de ar condicionado	32 a 43

Fonte: (BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY, 2010)

Conforme já destacado no Capítulo 1, os principais limites da recuperação de calor para produção de eletricidade estão associados à temperatura da fonte de calor. Para fontes de calor cujas temperaturas são inferiores a 400°C, a opção de ciclos Rankine orgânicos merece destaque.

Cabe também ressaltar que o calor recuperado substitui a necessidade de maior demanda para produção de energia térmica na unidade industrial, reduzindo as emissões atmosféricas e, em alguns casos, a necessidade de uso de sistemas de resfriamento para redução da temperatura de fluxos de exaustão antes do tratamento dos gases FORNI, *et al.*, (2014).

Dessa maneira, o uso de sistemas ORC para recuperação de calor residual pode ser sinérgico ao tratamento de gases de exaustão, fazendo a redução da temperatura para às condições demandadas no tratamento e ainda fornecendo a eletricidade demandada nesse processo. Como os processos de tratamento de gases são exotérmicos, sendo favorecidos por baixas temperaturas, o resfriamento do exausto é uma vantagem ao processo (ROCHEDO, 2011).

Unidades industriais que fazem uso da tecnologia ORC já se encontram em operação comercial, com destaques para os setores de cimento, siderurgia, vidro e sistemas de distribuição de gás natural, conforme listado na Tabela 16.

A seguir, serão analisados os setores industriais brasileiros onde é estimado que a produção de eletricidade com ORCs via recuperação de calor residual pode se apresentar como uma solução efetiva e viável. Os setores analisados são:

- Química
- Cimento
- Ferro-Gusa e Aço
- Vidros
- Alumínio
- Cerâmica

Tabela 16 – Lista de Unidades de recuperação de calor industrial utilizando ORC.

Ano	Local	Processo	Fornecedor	Potência [MW]
1999	Heidelberg Zement, Alemanha	Produção de Clínquer	ORMAT	1,5
2010	Italcementi - Ciment du Maroc, Marrocos	Produção de Clínquer	Turboden	1,8
2012	Holcim, Romenia	Produção de Clínquer	Turboden	4,0
2013	Jura Cement, Suíça	Produção de Clínquer	ABB	2,0
2014	Holcim, Eslováquia	Produção de Clínquer	Turboden	5,0
2015	Heidelberg Carpacement, Romenia	Produção de Clínquer	Turboden	4,0
2016	Jura Cement, Suíça	Produção de Clínquer	Turboden	2,0
2011	Vetrerie Sangalli Manfredonia, Itália	Vidros	ORMAT	2,0
2012	AGC Cuneo, Itália	Vidros	Turboden	1,3
2014	Sisecam, Bulgária	Vidros	Exergy	5,0
2014	Sisecam, Turquia	Vidros	Exergy	5,5
2014	Sisecam, Turquia	Vidros	Exergy	3,2
2015	Owen Illinois Vilotta de Chions, Itália	Vidros	Turboden	0,5
2013	NatSteel, Sigapura	Aço	Turboden	0,7
2013	Feralpi ESF, Alemanha	Aço	Turboden	2,7
2013	Trafilerie Gnutti, Tiália	Bronze	Exergy	2,4
2014	Fonderia di Torbole, Itália	Aço	Turboden	0,7
2014	ABS Udine, Itália	Aço	Exergy	1,0
2015	Ori Martin, Itália	Aço	Turboden	2,2
2014	Confidencial, Alemanha	Alumínio	Turboden	1,7
2016	Aichi Steel, Japão	Aço	Turboden	2,2
2016	Arvedi, Itália	Aço	Turboden	10,0
1991 a 2011	Canadá (7), USD (13), Espanha (12)	Compressão de Gás	ORMAT	3,5 a 7,0
2011	Rosetown, Canadá	Compressão de Gás	Turboden	1,0
2015	Lokoil Osa, Rússia	*O&G - Flare*	Turboden	1,8
2014 - 2015	Filipinas (2) e China (2)	*O&G*	Kaishan	0,4 a 1,8
2016	Uzbequistão	Compressão de Gás	Turboden	1,0

Os setores de Cimento, Ferro-Gusa e Aço e Vidro são constantemente analisados na literatura internacional devido às características de seus processos altamente energo-intensivos, recebendo ênfase nos estudos de FORNI, *et al.* (2012) e no projeto internacional H-REII (2013).

No presente estudo, os setores de química, alumínio e cerâmica também foram selecionados por apresentarem fornos com características favoráveis ao uso dos ORCs. Os subsetores sob análise serão detalhados a seguir.

3.2 – Química

A indústria química se destaca pela grande gama de produtos, estando presente em diversos bens de consumo e atividades econômicas, sendo caracterizado por uma alta intensidade de capital e grande diversidade de processos.

3.2.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Química Brasileira

A indústria química brasileira possui grande relevância na economia nacional, sendo responsável por 2,8% do PIB do país no ano de 2013 (ABIQUIM, 2015), com faturamento líquido de 156 bilhões de dólares.

Em termos de consumo energético, o setor químico respondeu por 2,9% do total da energia consumida no país no ano de 2013 (EPE, 2016), sendo responsável pela emissão de 4% dos gases de efeito estufa do Brasil (BNDES, 2016) e, de acordo com AIE (2014), é estimado que a indústria química mundial represente 7% das emissões de GEE do globo.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), o consumo de energia no setor de química é caracterizado por grande uso de gás natural, eletricidade e outras fontes secundárias de petróleo, totalizando 6.706 mil toneladas equivalentes de petróleo em 2013, a distribuição o uso de energéticos pode ser vista na Figura 38.

O setor químico possui uma grande heterogeneidade em seus processos industriais e apresenta grande diversidade de produtores e rotas de produção, atingindo um total de aproximadamente 70 mil produtos sintetizados.

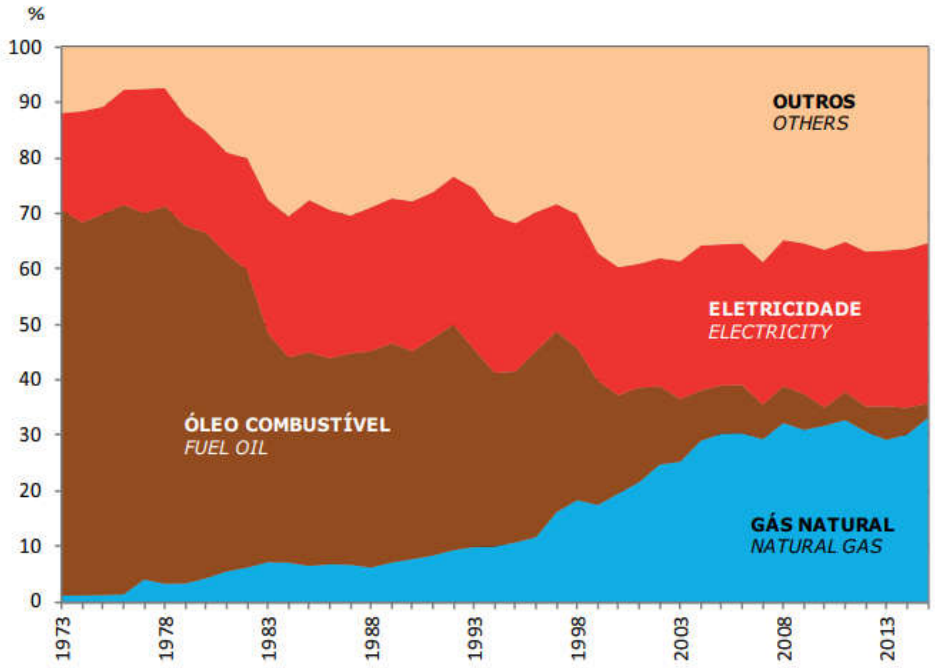


FIGURA 38 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR DE QUÍMICA.

FONTE: (EPE, 2016)

Em geral, a indústria química é segmentada em três grandes grupos:

- Produtos químicos para uso industrial
- Produtos químicos para uso final
- Transformação de plásticos e borrachas

Os produtos químicos para uso industrial consistem na produção petroquímica, de solventes, plastificantes e resinas, sendo o principal grupo da indústria em relação à atividade de indústria de base, representando cerca de 45% do faturamento do setor em 2014 de acordo com a ABIQUIM (2015).

Os produtos químicos de uso final são aqueles diretamente comercializados para o mercado final, incluído produtos farmacêuticos, de limpeza, fertilizantes, higiene pessoal, perfumaria, cosméticos, agrotóxicos, vernizes e tintas, fibras sintéticas e artificiais, representando 55% do faturamento líquido do setor químico.

Já o setor de transformação de borrachas e plástico está relacionado a atividades produtivas destinadas ao consumidor final, entretanto possui um peso econômico normalmente analisado em separado do segmento de produtos químicos de uso final.

Conforme observado no Figura 39, o estado de São Paulo possui o maior número de fábricas do país, seguido pelo Rio de Janeiro e Bahia.

FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DAS INDÚSTRIAS QUÍMICAS NO BRASIL.

FONTE: (PWC, 2013)

As principais empresas do setor são a Braskem, BASF, Air Liquide, Carbocloro, Bayer, Clariant, Akzo Nobel DyStar, Kraton, Oxiteno, Petrom, Carbor e Unigel. Sendo apenas a Braskem responsável por um faturamento líquido de 35 bilhões de reais em 2012 (PWC, 2013).

Entre 1996 e 2012 a indústria química apresentou um fator de utilização variando entre 80% e 90%, como destacado na Figura 40.

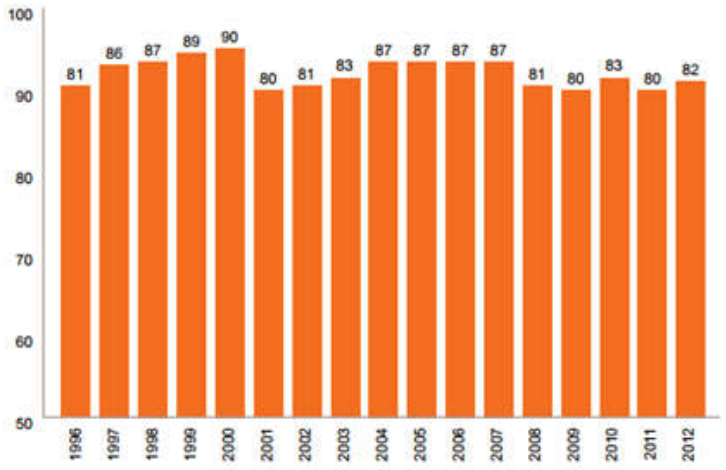


FIGURA 40 - FATOR DE UTILIZAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA NO BRASIL.

FONTE: (PWC, 2013)

Nesta tese, será dada ênfase ao subsetor químico de eteno, uma vez que os fornos de produção apresentam potenciais significativos para recuperação de calor da exaustão (DOE, 2008).

Segundo a ABIQUIM (2015), a produção de eteno no Brasil atingiu 3,237 milhões de toneladas em 2014, uma redução de 4,1% em relação ao ano de 2013.

A capacidade instalada para produção de eteno no Brasil é equivalente a 3,952 milhões de toneladas ao ano, sendo a Braskem responsável por 100% dessa capacidade, com fábricas nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Rio Grande do Sul e Bahia.

3.2.2 – Recuperação de Calor na Indústria Química

A recuperação de calor de processos na indústria química já amplamente praticada no mercado, vem sendo focada basicamente na integração de processos para aumento da eficiência global da unidade. Entretanto, o uso de unidades de pequeno porte para

produção de eletricidade a partir de calor residual não é algo comum nesse segmento industrial.

Em unidades produtoras de ácido nítrico, caprolactama e hidroxilamina, um único fornecedor de equipamentos possui mais de 200 instalações para recuperação de calor de processo. A amônia presente nos gases de processo é queimada, produzindo óxido nítrico a altas temperaturas (até 950 ºC), onde os gases de combustão são então resfriados em trocadores de calor para produção de vapor para outros processos industriais (OSCHATZ, 2016).

Nas unidades de produção de ácido sulfúrico existem reações catalíticas exotérmicas que demandam processos de resfriamento especiais. Dessa forma, existem sistemas de recuperação de calor que resfriam os gases contendo dióxido de enxofre após a unidade de combustão.

Outro exemplo está na recuperação de calor de gases e líquidos eliminados, geralmente associados a processos de descarte de ácido acrílico, butanodiol e tetrahidrofurano (OSCHATZ, 2016). Essas unidades são compostas por sistemas de recuperação de calor complexas, com sistemas de combustão especial para queima dos resíduos e manutenção dos níveis de emissão permitidos e unidades de produção de vapor superaquecido.

A recuperação de calor em fornos de produção de eteno é discutida como um dos pontos que merecem atenção no estudo do DOE (2008), sendo o eteno é o maior produto petroquímico dos EUA (e também do Brasil), funcionando como um elemento chave para diversos outros processos químicos. O forno de pirólise é um elemento fundamental no processo produtivo, onde os hidrocarbonetos são craqueados em temperaturas em torno de 870 ºC a 760 ºC (ENERGETICS, 2000), sendo o esquema do processo de produção mostrado na Figura 41.

A intensidade energética da produção de eteno varia em função da qualidade da matéria-prima utilizada, demandando cerca de 17,6 GJ/t de produto na rota etano-eteno e 29,9 GJ/t na rota nafta/gás – eteno (DOE, 2006). Nos EUA, estima-se que cerca de 58% do consumo energético desse processo seja demandado pelo forno de eteno (DOE, 2006).

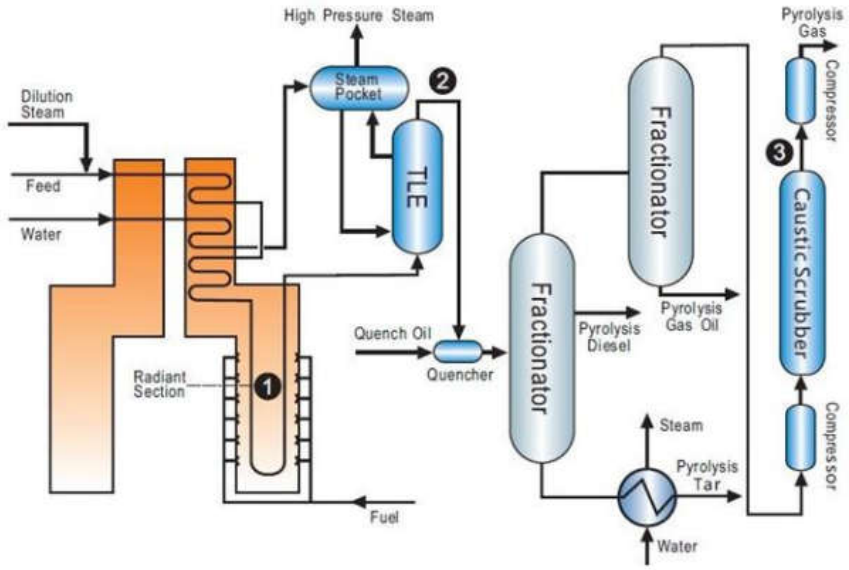


FIGURA 41 – ESQUEMÁTICO DA PRODUÇÃO DE ETENO.

FONTE: (QUANTITECH, 2017)

O forno, em geral, é composto por uma seção radiativa e convectiva, sendo os gases de exaustão do forno com temperaturas tipicamente baixas, em torno de 150 ºC, permitindo apenas certas integrações de processo para pré-aquecimento ou a adoção de sistemas ORC para produção de potência elétrica.

A recuperação de calor em FPSOs (Floating Production Storage and Offloading) utilizando ORCs tem sido amplamente estudada devido ao seu alto potencial ao acoplar esses sistemas em turbinas a gás. Sendo o ciclo ORC utilizado como um "fechamento de ciclo" para as turbinas a gás produtoras de eletricidade em FPSOs, e que garante maior eficiência de conversão do gás natural em eletricidade.

Finalmente, deve-se mencionar a recuperação de calor em refinarias, conforme demonstrado no estudo de CHEN, *et al.*, (2016) para adoção de sistemas ORC para a recuperação de calor no sistema de pré-aquecimento de petróleo bruto, onde foi estudada uma configuração para recuperar calor de seis fontes com baixíssimas temperaturas (entre 107 e 172 ºC) para produção de potência elétrica.

3.3 – Cimento

A produção de cimento é um processo energo-intensivo, e que faz uso de grandes quantidades de energia durante o processo, desde a preparação da matéria-prima até a finalização do produto. Além disso, as fábricas de cimento produzem grandes volumes de emissões atmosféricas devido à queima de combustíveis fósseis e ao processo de calcinação.

O processo industrial consiste na transformação da matéria prima, onde elementos como calcário, argila e areia são extraídos, moídos e misturados na composição química correta. Normalmente, a matéria-prima alimenta um forno cilíndrico[6] (kiln) onde é aquecida até temperaturas da ordem de 1450 ºC. A alta temperatura faz com que a matéria-prima reaja, formando um material nodular e duro, denominado clínquer. O clínquer é resfriado e moído com outros aditivos para produzir o cimento. Dessa forma, além dos processos de obtenção da matéria-prima, existem cinco processos bem definidos na produção de cimento, conforme mostrado na Figura 42.

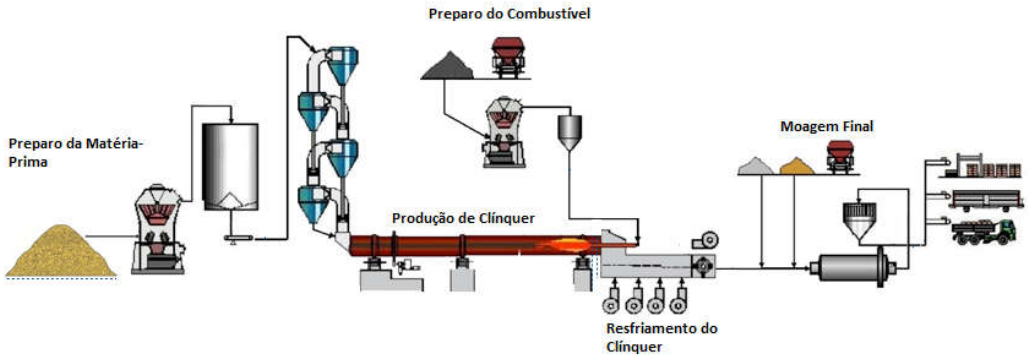


Figura 42 - Esquema da produção de Cimento.

Fonte: (IIP, 2016)

---

[6] O clínquer pode ser produzido de diferentes maneiras, existindo duas configurações de fornos (*kilns*) básicas – Verticais ou Rotativos – onde diversas variações de cada tipo são utilizadas em todo o mundo. Tipicamente, os fornos (kilns) verticais são utilizados em unidades mais antigas e menos eficientes. Unidades modernas de produção de cimento normalmente fazem uso de kilns rotativos e processos de via seca, incorporando diversos estágios de pré-calcinação e pré-aquecimento.

3.3.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Cimento Brasileira

A produção de cimento brasileira é uma indústria extremamente dinâmica, que respondeu ao aumento de demanda no setor de construção do país, dobrando sua produção e expandindo a capacidade instalada em 50% na última década, atingindo em 2014 o valor de 71 milhões de toneladas produzidas (Figura 43), com capacidade instalada para 93 milhões de toneladas/ano. Contando com 97 unidades operacionais (SNIC, 2015).

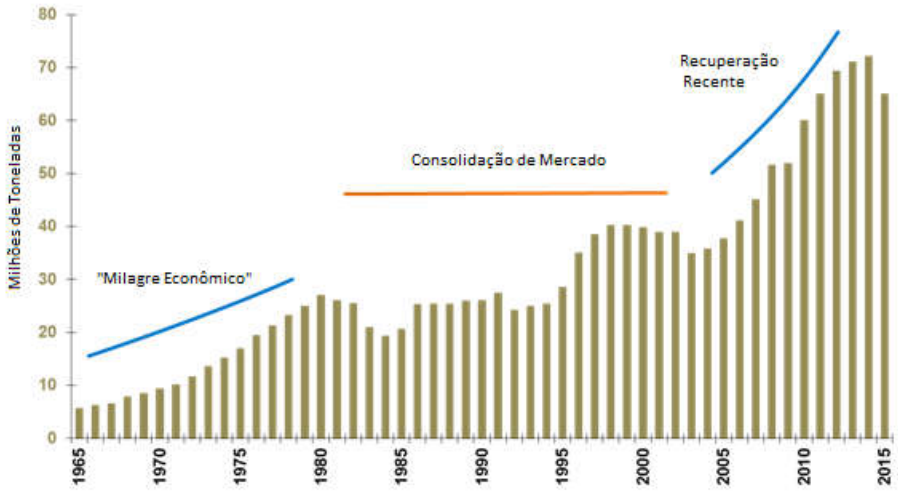


Figura 43 - Produção histórica de Cimento no Brasil.

Fonte: (SNIC, 2015)

As rápidas transições são típicas no setor industrial de cimento, onde as grandes transformações são focadas no aumento da eficiência energética e na redução de emissões de dióxido de carbono. Entre a década de 1970 e os anos 2000, o mix de combustíveis do setor de cimento passou por drásticas mudanças em relação ao uso de óleo combustível, carvão vegetal e carvão, atingindo mais recentemente a predominância do coque de petróleo e uso de fontes combustíveis não convencionais, como a biomassa, Figura 44. A adoção do coque de petróleo não se deu devido às questões de aumento de eficiência ou redução de emissões atmosféricas, mas sim por conta de seu baixo preço e alta disponibilidade no país (SNIC, 2015).

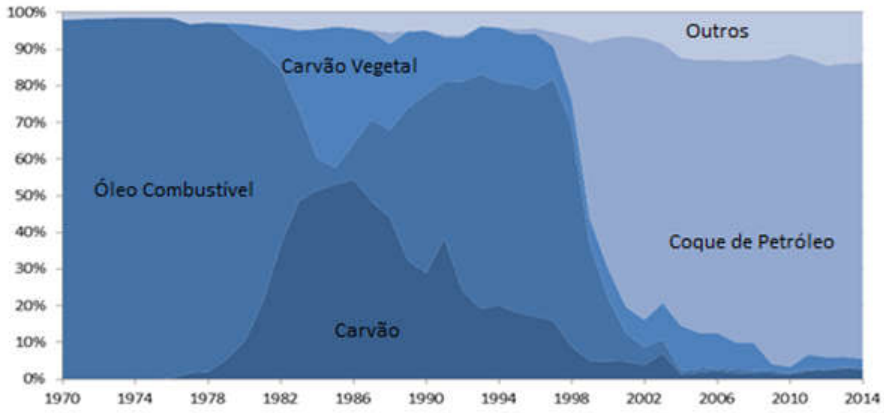


Figura 44 – Uso de combustíveis na Indústria de Cimento Brasileira.

Fonte: (SNIC, 2015)

A produção de cimento no Brasil se dá basicamente através do processo de via seca, o mais eficiente em termos energéticos, sendo que o processo de transição entre as rotas (úmida para seca) levou menos de duas décadas (1970 e 1980), Figura 45.

A eficiência energética é uma prática comum no setor de cimento, que se tornou fundamental após as crises do petróleo de 1974 e 1980. Nesse período, no Brasil, diversas empresas adotaram medidas de eficiência energética em seus processos, que variaram desde ajustes operacionais simples até investimentos significativos em novos equipamentos (SNIC, 2015).

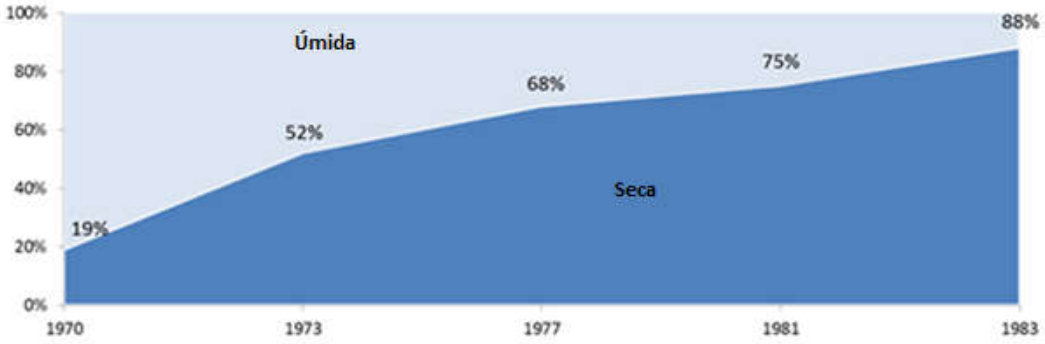


Figura 45 - Variação das rotas de produção de cimento no Brasil ao longo dos anos.

Fonte: (SNIC, 2015)

Outra importante medida que contribuiu para a eficientização do setor de cimento foi a redução da razão de clínquer na produção de cimento, como mostrado na Figura 46, reduzindo de 80% no início dos anos 1990 para o patamar de 68% em 2013 (SNIC, 2015).

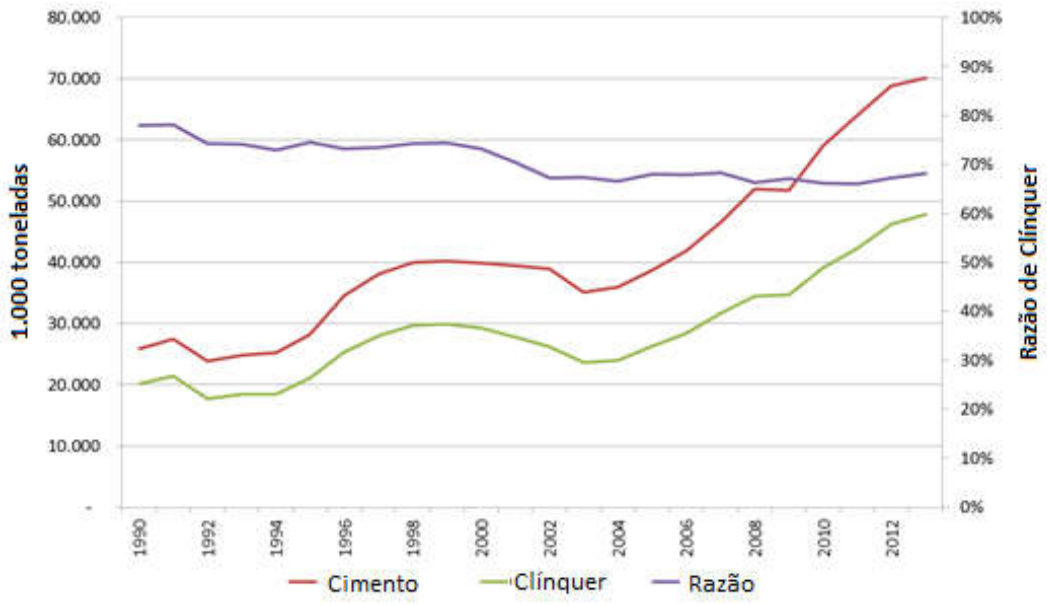


Figura 46 - Evolução da Fração de Clínquer no Cimento.

Fonte: (SNIC, 2015)

Essa combinação de medidas para o aumento da eficiência na indústria de cimento, teve como impacto direto a redução em cerca de 45% no consumo específico de energia térmica no setor, como mostrado na Figura 47. Onde, de acordo com a CSI (2013) e o SNIC (2015)**,** no Brasil, a produção de energia térmica na indústria é dividida conforme a Tabela 17. A maior parcela da energia térmica é produzida pelo uso de coque de petróleo, seguida de biomassa e resíduos fósseis.

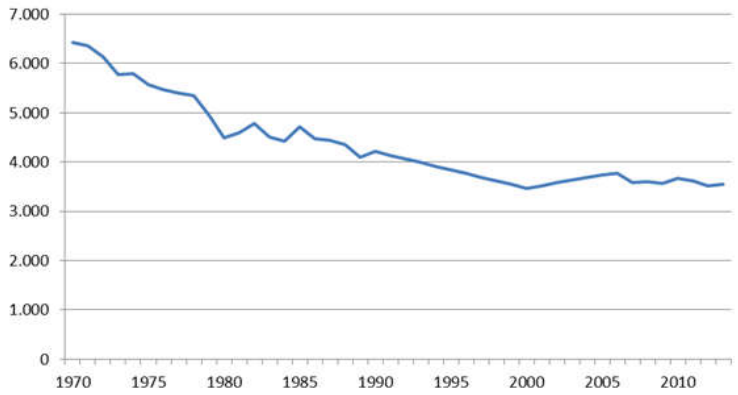


Figura 47 - Consumo específico [MJ/tonelada de clínquer de energia térmica no setor de cimento Brasileiro.

Fonte: (SNIC, 2015)

Tabela 17 – Uso de Combustíveis para Produção de Energia Térmica na Indústria de Cimento Brasileira.

Combustível	Uso (%) 2014
Fósseis Convencionais	
Coque de Petróleo	85,2
Biomassa	
Carvão Vegetal	6,0
Outras Biomassas	0,7
Resíduos Fósseis	
Pneus	4,6
Resíduos industriais (*blends*)	3,5

Fonte: (SNIC, 2015) e (CSI, 2013)

O consumo específico de eletricidade do setor também vem apresentando melhoras significativas ao longo dos anos. Atualmente, a indústria de cimento brasileira opera com um consumo médio de eletricidade de 105 kWh/tonelada de cimento (CSI, 2014).

Finalmente, vale destacar a adoção de diversos tipos de tecnologias de recuperação calor dos forno (kilns), fazendo uso de pré-aquecedores e pré-calcinadores. Estas medidas acarretaram na redução das emissões de dióxido de carbono, que atingiram patamares muito abaixo da média mundial, apresentando um índice de 0,22 tCO_2/t de cimento, enquanto a média global é de 0,73 tCO_2/t de cimento (IEA, 2009).

3.3.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Cimento

A literatura indica que os primeiros exemplos de recuperação de calor residual para produção de eletricidade utilizando ciclos ORCs surgiram na indústria de cimento (CASCI, *et al.*, 1981). Sendo comum verificar o uso de sistemas a vapor para produção de eletricidade, principalmente na China, onde as fábricas de cimento possuem grande capacidade (WENG, *et al.*, 2013).

Entretanto, ao longo das últimas décadas os ORCs vêm ganhando destaque a indústria de cimento. A Figura 48 exemplifica uma aplicação de ORC na indústria cimenteira, onde o calor é recuperado em dois pontos:

- À montante do sistema de preaquecimento da matéria-prima (ciclones), com temperatura variando entre 300 e 450 ºC;
- Apartir dos ases de saída dos resfriadores de clínquer, com temperatura média da ordem de 300°C.

A recuperação de calor residual na produção de cimento pode atingir uma produção de eletricidade capaz de suprir cerca de 20% de demanda elétrica da fábrica (POLITECNICO DI MILANO, 2012).

De acordo com estudos do HREII (2013), na Europa existem mais de 250 fábricas de cimento, resultando em um potencial para produção de eletricidade de aproximadamente 580 MW, conforme Tabela 18.

Conforme destacado anteriormente, o Brasil possui uma produção significativa de cimento, com potencial crescimento devido às demandas de infraestrutura do país (SNIC, 2015). O estudo de (IFC, 2015) indicou o potencial brasileiro para recuperação de calor como um dos mais significativos, conforme destacado na Tabela 19.

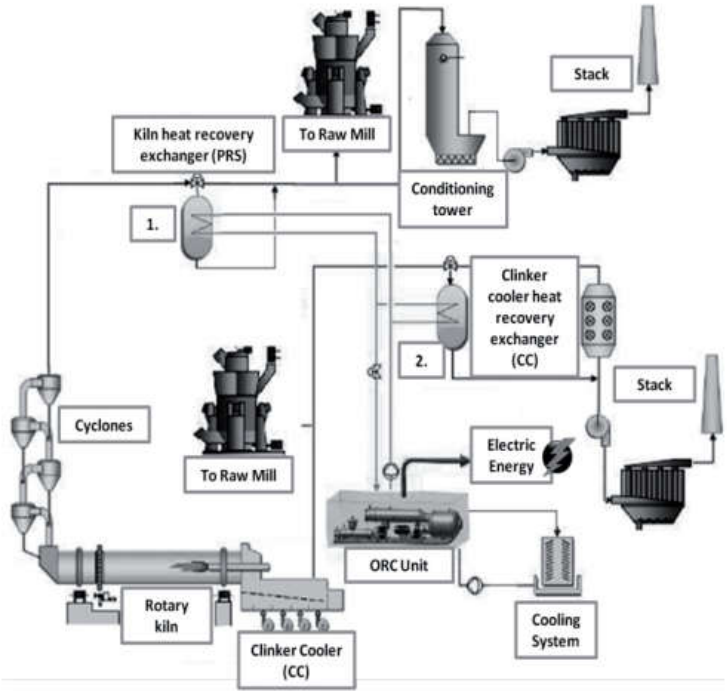


Figura 48 - Recuperação de calor para produção de eletricidade em uma unidade produtora de cimento.

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

Tabela 18 - Estimativa de Geração via ORC na indústria europeia de Cimento

País	Capacidade Diária [t]	Potência ORC Total [MW]
Itália	111,7	86,7
Alemanha	69,8	70,3
Espanha	116,5	117,3
França	49,6	49,9
Reino Unido	25,1	25,3
Bélgica	10,7	10,7
Áustria	10,4	10,5
Rep. Checa	12,7	12,8
Outros	189,3	192,5
Total	**595,8**	**576**

Fonte: (HREII, 2013)

Tabela 19 – Oportunidade de Mercado para Recuperação de Calor na Indústria de Cimento.

País	Potencial de Recuperação de Calor [MW]	Crescimento no Mercado [2012 - 2014]	Preocupações sobre fornecimento de energia	Preço da Eletricidade [US$/MWh]	Estabilidade Política*	Incentivos Regulatórios / Sustentabilidade	Capacidade Instalada
Brasil	190 - 340	4,7%	Não	120 - 170	47,9	Sim	Nenhuma
Egito	175 - 300	2,6%	Sim	50 - 70	7,58	Não	Nenhuma
Índia	500 - 900	12,4%	Sim	80	11,85	Sim	Acima de 200 MW
México	170 - 300	-1,7%	Não	117	24,17	Não	Nenhuma
Nigéria	70 - 130	21,1%	Sim	50 - 100	3,32	Não	Nenhuma
Paquistão	50 - 100	-0,4%	Sim	130 - 170	0,95	Não	Acima de 100 MW
Filipinas	60 - 110	13,6%	Sim	80 - 145	14,69	Não	Acima de 18 MW
África do Sul	55 - 100	9,5%	Sim	80 - 150	44,08	Sim	Nenhuma
Tailândia	30 - 60	14,4%	Não	50 - 100	12,8	Não	Acima de 172 MW
Turquia	150 - 280	17,5%	Sim	100 - 150	13,27	Não	Acima de 80 MW
Vietnã	165 - 310	5,8%	Não	60 - 70	55,92	Não	Acima de 11 MW

Fonte: (WORLD BANK, 2014)

* Indicadores Internacionais descritos em: http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#reports.

NOTA: O código de cores indica quando verde: fator positivo para adoção de recuperação de calor de rejeito; cinza: fator levemente positivo para desenvolvimento de recuperação de calor de rejeito; e vermelho: fator fraco para o desenvolvimento de recuperação de calor de rejeito.

3.4 – Ferro-Gusa e Aço

O processo de fabricação de ferro e aço inclui quatro partes distintas: preparação do material, fabricação do ferro-gusa, fabricação do aço e a manufatura do aço (UBIETO, 2012).

- Preparação do minério de ferro e do carvão mineral – Coqueria e Sinterização
- Redução do minério de ferro para produção de ferro-gusa – Alto-fornos
- Refino – Aciaria
- Conformação mecânica do aço – Lingotamento e laminação

Figura 49 - Etapas da produção de aço e ferro.

A produção de aço pode ser realizada por diferentes rotas que englobam as diversas tecnologias existentes. São elas:

- Redução em Alto-forno e produção de aço via Conversor a Oxigênio (AF+CO) – Rota Integrada;
- Fusão Redutora e produção de aço via Conversor a Oxigênio (FR+CO) – Rota Integrada;
- Redução Direta e produção de aço via Forno Elétrico a Arco (RD+FEA) – Rota Semi-Integrada;
- Produção de Aço via sucata utilizando Forno Elétrico a Arco (sucata + FEA) – Rota Semi-Integrada.

O processo de produção de aço, em suas diferentes rotas, é ilustrado na Figura 50.

É importante ressaltar que a intensidade de emissões de carbono e o consumo de energia na indústria de ferro e aço depende consideravelmente da rota utilizada, variando de 400 kg/CO_2 por tonelada de aço produzido através de sucata em fornos elétricos a arco, 1700 a 1800

$kgCO_2$/tonelada de aço produzido em rotas integradas com alto-fornos e conversores a oxigênio, podendo atingir 2500 $kgCO_2$/tonelada de aço produzido em rotas que utilizam carvão para o processo de redução direta (DRI) (WORD STEEL ASSOCIATION, 2014).

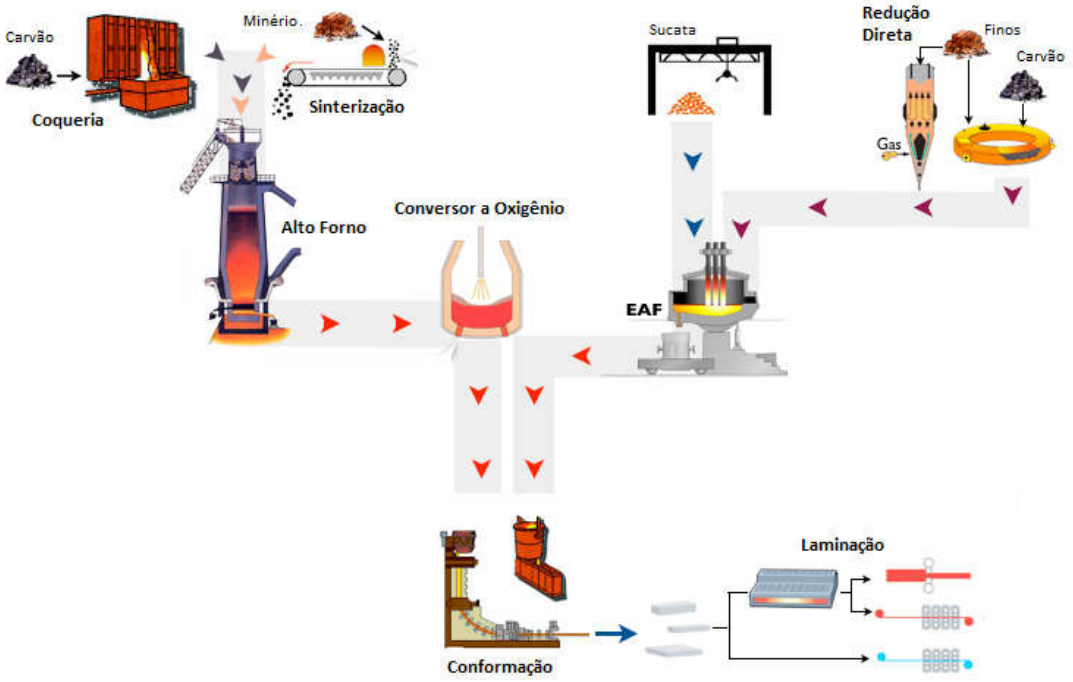


Figura 50 - Esquema da produção de Aço.

Fonte: (IIP, 2016)

3.4.1 – Caracterização Setorial da Indústria de Ferro-Gusa e Aço Brasileira

O Brasil é o nono maior produtor de aço bruto[7] do mundo, atingindo, em 2012, a produção de 2,2% do aço bruto mundial, e na América Latina é responsável por 52,5% da produção total

[7] Aço bruto, de acordo com o Instituto Aço Brasil, corresponde à produção de aço em lingotes, produtos de lingotamento contínuo e aço para a fundição (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).

(INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013). A Tabela 20 mostra um comparativo da produção de aço bruto no Brasil com o mundo.

Tabela 20 – Produção da Siderurgia Mundial e Brasileira de Aço Bruto – Milhões de toneladas

Produção de Aço Bruto	1970	1980	1990	2000	2010	2012
Mundial (A)	595,4	715,6	770,5	848,9	1.431,4	1.547,4
América Latina (B)	13,2	28,9	38,2	56,1	61,7	65,7
Brasil (C)	5,4	15,3	20,6	27,9	32,9	34,5
C/A (%)	0,9	2,1	2,7	3,3	2,3	2,2
C/B (%)	40,9	52,9	53,9	49,7	53,3	52,5
Posição relativa do Brasil no mundo	18º	10º	9º	8º	9º	9º

Fonte: (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013)

Os produtos do setor são bem diversificados. Abrangem desde produtos intermediários (sínter e ferro-gusa) a produtos acabados de maior valor, como placas, lingotes, bobinas, chapas, barras, tarugos e outros laminados.

Dentre os segmentos industriais brasileiros, o setor siderúrgico é o maior responsável por emissões de gases de efeito estufa, representando, em 2010, cerca de 37% das emissões da indústria brasileira (MCTIC, 2016).

A indústria do aço foi responsável por 4,8% do valor total da produção econômica nacional (CNI, 2012). Mesmo atendendo principalmente a demanda interna, o excedente produtivo representa um volume importante das exportações brasileiras, tendo, em 2012, a balança comercial do setor apresentado um saldo de US$ 3,78 bilhões (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).

Entretanto, desde 2005, a indústria siderúrgica brasileira não opera com utilização da capacidade superior a 85%. Em 2012, atingiu a taxa de utilização média de 73%, conforme mostrado na Figura 51.

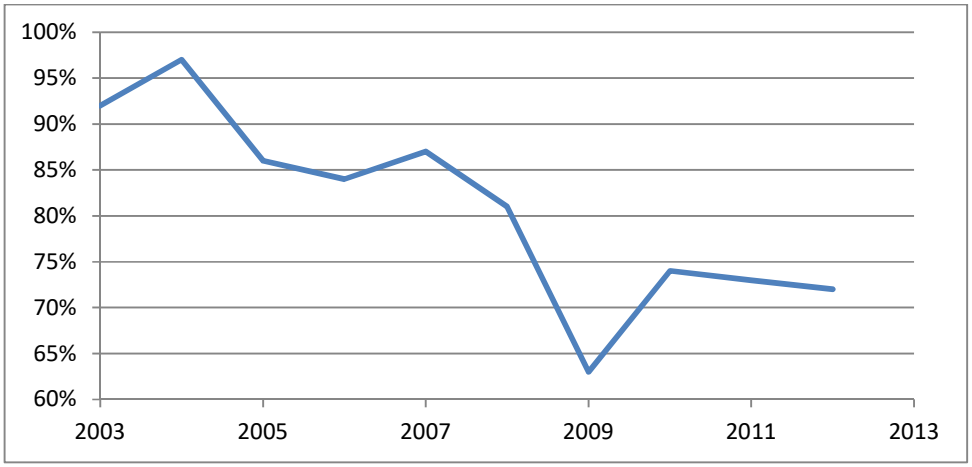


Figura 51 – Utilização da Capacidade da Indústria Siderúrgica Brasileira

Fonte: (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013)

As usinas integradas são responsáveis por produzir a maior parte do ferro-gusa nacional, atingindo, em 2013, um total de 26.206.700 toneladas de ferro-gusa, valor que representa 83% da produção total brasileira (SINDIFER, 2016).

Existem no país cinco estados produtores de ferro-gusa: Minas Gerais, Maranhão e Pará (Carajás), Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Essa produção se dá através de produtores independentes (detalhado na Tabela 22) ou usinas integradas.

O Brasil é o principal produtor de ferro-gusa utilizando carvão vegetal do mundo. Estima-se que cerca de 2,9 milhões de toneladas de ferro-gusa foram produzidos a partir de carvão vegetal em 2013 (SINDIFER, 2016), o que representa cerca de 54% do ferro-gusa produzido em usinas de produtores independentes, ou cerca de 9% da produção total de ferro-gusa no Brasil.

Tabela 21 – Produção Independente de Ferro-Gusa no Brasil

ANO	MG	%	CARAJÁS[8]	%	ES	%	MS	%	TOTAL
2000	4.039.932	65,7	1.652.000	27	372.925	6,1	80.520	1,3	6.145.377
2001	4.005.548	61,5	2.021.500	31	387.185	5,9	96.000	1,5	6.510.233
2002	4.043.163	59,8	2.245.000	33	375.727	5,6	96.000	1,4	6.759.890
2003	5.193.060	64,1	2.364.500	29	450.304	5,5	96.000	1,2	8.103.864
2004	6.302.964	62,5	3.102.750	30,7	499.358	5	180.000	1,8	10.085.170
2005	5.797.999	59,3	3.228.287	33	505.795	5,2	241.653	2,5	9.773.832
2006	5.353.664	56,5	3.452.400	36,5	376.755	4	282.800	3	9.465.716
2007	5.042.637	52,4	3.927.800	40,8	350.521	3,6	307.100	3,2	9.628.058
2008	4.303.302	50,3	3.543.718	41,4	280.865	3,3	424.500	5	8.552.385
2009	2.380.600	54	1.710.000	38,8	-	1,4	253.500	5,8	4.344.100
2010	2.904.187	57,8	1.661.333	33	198.700	4	263.167	5,2	5.027.387
2011	2.998.000	51,5	2.019.004	34,7	357.000	6,1	450.000	7,7	5.824.004
2012	2.738.437	49,4	2.058.146	37,1	260.227	4,7	491.241	8,8	5.548.051
2013	2.924.957	54,6	1.763.104	33	195.988	3,7	468.025	8,7	5.352.074
2014	2.914.132	57,9	1.462.516	29	226.304	4,5	433.000	8,6	5.035.952
2015	2.562.327	59,5	1.291.440	30	215.976	5	237.255	5,5	4.306.998
2016	2.302.368	64,8	858.885	24,2	220.929	6,2	169.108	4,8	3.551.290

Fonte: SINDIFER, 2016

[8] Aqui se incluem os estados do Maranhão e do Pará.

De acordo com as informações do Balanço de Energia Nacional – BEN (EPE, 2017), a energia final consumida pela indústria de ferro e aço no Brasil, em 2016, foi de 14,96 milhões de tep, valor equivalente a 17,8% da demanda final do setor industrial no ano de 2016 e que indica queda em relação ao ano de 2015, porém ainda mantendo um patamar superior ao atingido em 2009, após a crise internacional.

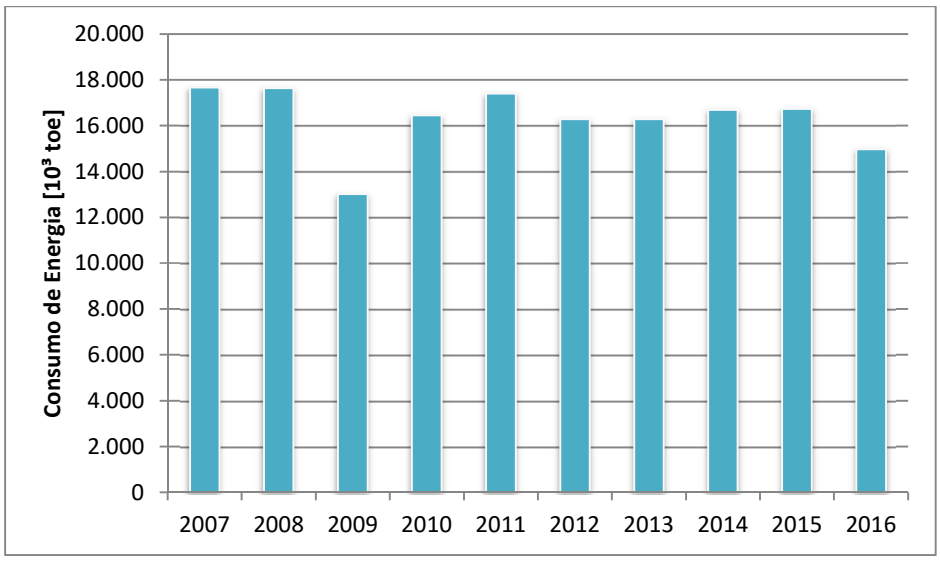


Figura 52 – Variação do Consumo de Energia do Setor de Ferro e Aço Brasileiro

Fonte: (EPE, 2017)

Do total consumido de energia, 44,6% são representados pelo consumo de coque de carvão mineral, enquanto 19,9% são relativos ao uso de carvão vegetal. O uso de eletricidade representa 10,1% do total do consumo de energia. Os dados do consumo de energia separados por fonte são detalhados na Tabela 22.

Na Figura 53, é mostrada a evolução do consumo de energia no setor de ferro e aço de 1973 até 2013 e a participação percentual dos principais insumos energéticos.

A quantidade de carvão mineral empregada na indústria siderúrgica vem aumentando desde o início dos anos 1990, devido à substituição parcial de coque por carvão pulverizado injetado nos altos-fornos (CNI, 2010). A participação de gás natural cresce lentamente, enquanto a utilização de óleo combustível é reduzida.

Tabela 22 – Consumo Energético da Indústria de Ferro e Aço Brasileira (tep)

Fontes	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	1.214	1.158	695	897	997	1.067	1.020	1.036	1.223	1.012
Carvão	1.939	2.052	1.578	1.772	1.924	1.854	1.808	2.053	2.124	1.935
Óleo diesel	14	14	14	15	35	38	37	35	29	25
Óleo combustível	145	142	114	168	29	29	40	35	2	2
GLP	88	97	90	71	26	20	19	26	25	59
Gás de coqueria	1,039	1.065	1.011	1.250	1.288	1.137	1.200	1.200	1.148	1.114
Coque de carvão mineral	6.320	6.289	4.969	7.153	7.750	7.495	7.309	7.237	7.441	6.728
Eletricidade	1.579	1.602	1.281	1.613	1.714	1.696	1.691	1.671	1.609	1.484
Carvão vegetal	4.775	4.679	2.724	3.372	3.492	3.338	3.021	2.962	2.988	2.490
Alcatrão/outros sec. do petróleo	551	528	531	134	145	139	129	133	135	119
TOTAL	**17.664**	**17.627**	**13.008**	**16.445**	**17.401**	**16.274**	**16.274**	**16.687**	**16.725**	**14.969**

Fonte: EPE, 2013

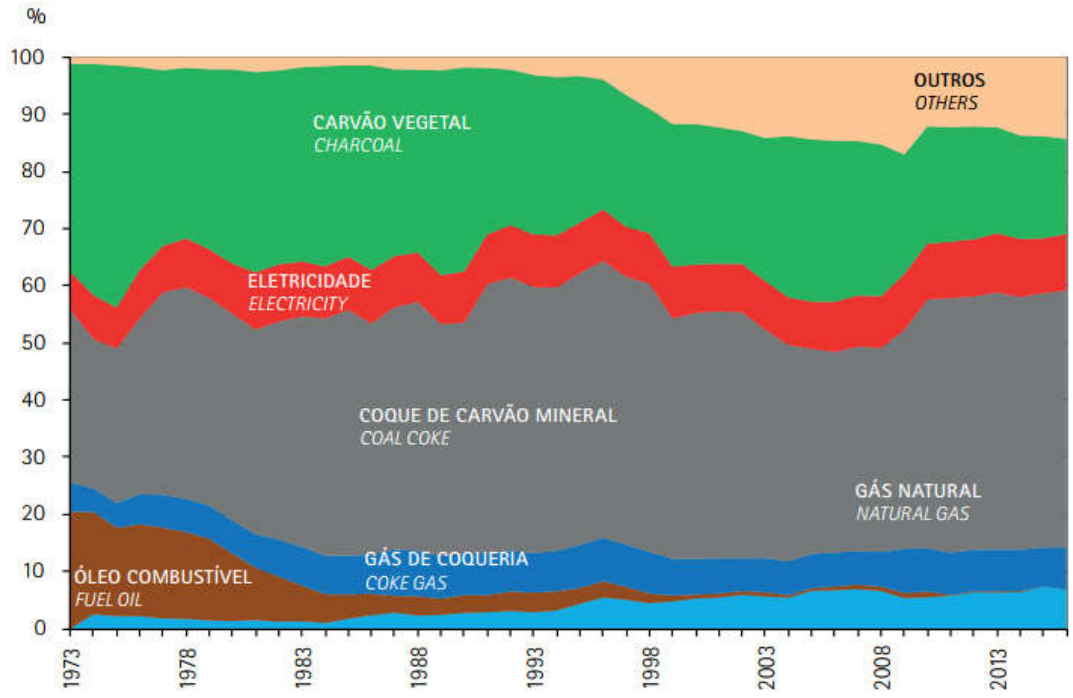


Figura 53 – Estrutura de Consumo do Setor de Ferro e Aço Brasileiro

Fonte: (EPE, 2017)

Os produtores independentes de ferro-gusa no Brasil são inúmeros, muitos deles com altos-fornos de pequena capacidade e sem que órgãos governamentais e associações setoriais tenham informações técnicas detalhadas de seus processos de produção. O Instituto Brasileiro de Siderurgia adota o valor de 25,4 GJ/tonelada para estimar o consumo específico de energia dos produtores independentes de ferro-gusa (CNI, 2010).

No ano de 2016, os produtores independentes de ferro-gusa foram responsáveis pela produção de 3,5 milhões de toneladas, das quais somente 1,4 milhões foram destinadas ao mercado interno brasileiro (SINDIFER, 2016) e 2,1 milhões de toneladas foram exportadas. Assim, pode-se estimar que o consumo energético dos produtores independentes para produzir ferro-gusa destinado ao mercado exterior foi de aproximadamente 53,3 PJ (resultado do produto 25,4 GJ/tonelada x 2,1 milhões de toneladas).

Dessa forma, ao subtrair 53,3 PJ dos 626 PJ totais da siderurgia, obtém-se uma estimativa da energia total consumida em 2016 para produção de aço no Brasil, equivalente a 573,4 PJ. Sabendo que a produção brasileira de aço bruto foi de 31,3 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013), obtém-se o consumo específico médio de 18,32 GJ/tonelada de aço bruto.

Esse resultado mostra um bom grau de eficiência do setor siderúrgico nacional, estando próximo dos valores indicados pela World Steel Association, de 20 GJ/tonelada de aço (WORD STEEL ASSOCIATION, 2014). A boa qualidade do minério de ferro brasileiro pode ser citada como um fator que favorece essa condição (CNI, 2010).

3.4.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Ferro e Aço

A recuperação de calor de processos siderúrgico para produção de eletricidade já é utilizada em grandes usinas integradas, que fazem uso dos gases de coqueria em caldeiras para produção de vapor. Entretanto, o uso da recuperação de calor residual de processos para produção de eletricidade ainda não é uma prática comum no setor.

Sistemas ORC já foram utilizados para produção de eletricidade em usinas siderúrgicas em duas fontes:

- Fornos de aquecimento de tarugo
- Exaustão de fornos elétricos a arco

Os fornos de aquecimento de tarugo são responsáveis por elevar a temperatura do aço até 1.500 °C, para que o metal seja processado nos laminadores. Em geral, esses fornos fazem uso de queimadores a gás natural, gerando, portanto, gases de exaustão relativamente mais limpos, o que reduz os custos com sistemas de trocadores de calor para a recuperação de sua energia. A Figura 54 ilustra o processo de recuperação de calor nesses fornos.

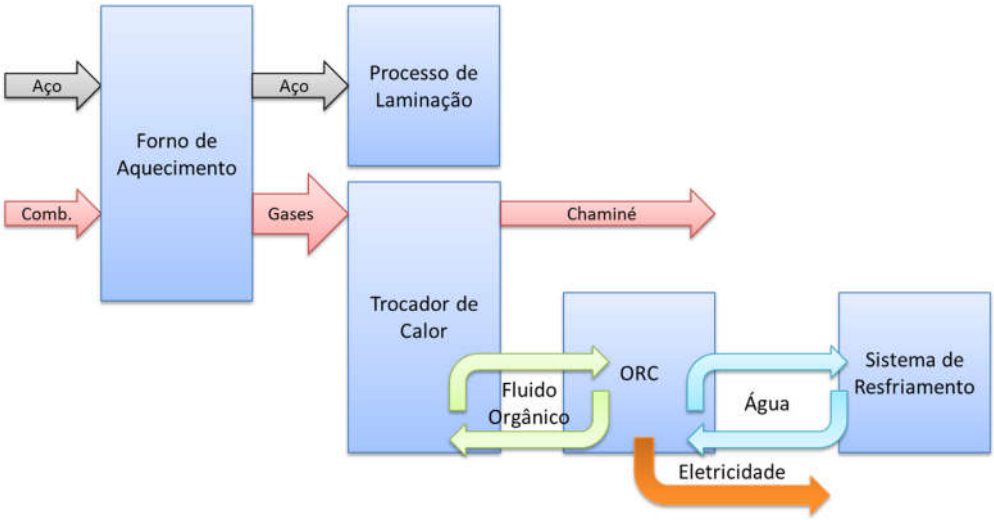


Figura 54 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC num forno de Aquecimento de Tarugo.

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

Uma das primeiras aplicações de recuperação de calor em fornos de aquecimento de tarugo utilizou máquinas da fabricante Turboden, em Singapura, e obteve resultados positivos. Segundo a TURBODEN (2015), o sistema ORC foi capaz de se adequar às flutuações na operação do forno, se adaptando rapidamente em função da energia térmica disponível na fonte quente, algo impraticável para turbinas a vapor.

De acordo com ORC, HREII (2013), apenas na Europa, que possui cerca de 260 unidades de laminação com fornos de reaquecimento de tarugo, o potencial de ORCs nessa fonte atinge 300 MW de potência.

A exaustão dos fornos elétricos a arco em usinas semi-integradas (minimills) também possui características onde o uso de sistemas ORC merece destaque. Devido à operação dos EAFs em bateladas, a energia disponível na exaustão do equipamento está sujeita à grande variação, onde durante o processo de fusão as temperaturas podem atingir 1.500 °C, enquanto no momento onde um novo carregamento de sucata é inserido na fornalha esse valor cai de forma abrupta.

Em um projeto de recuperação de calor de EAFs na Alemanha, fez-se uso de um sistema de termo acumulação, onde um tubulão de vapor armazena a energia térmica extraída do forno durante a fusão, na forma de vapor a 27 bar e temperatura de 245°C, empregando dois trocadores de calor. Cabe observar que as condições do vapor gerado, não permitiam que o mesmo fosse expandido em uma turbina para produção de potência, demandando assim o uso de um ORC. A Figura 55 mostra o processo de recuperação no EAF feito no projeto supracitado.

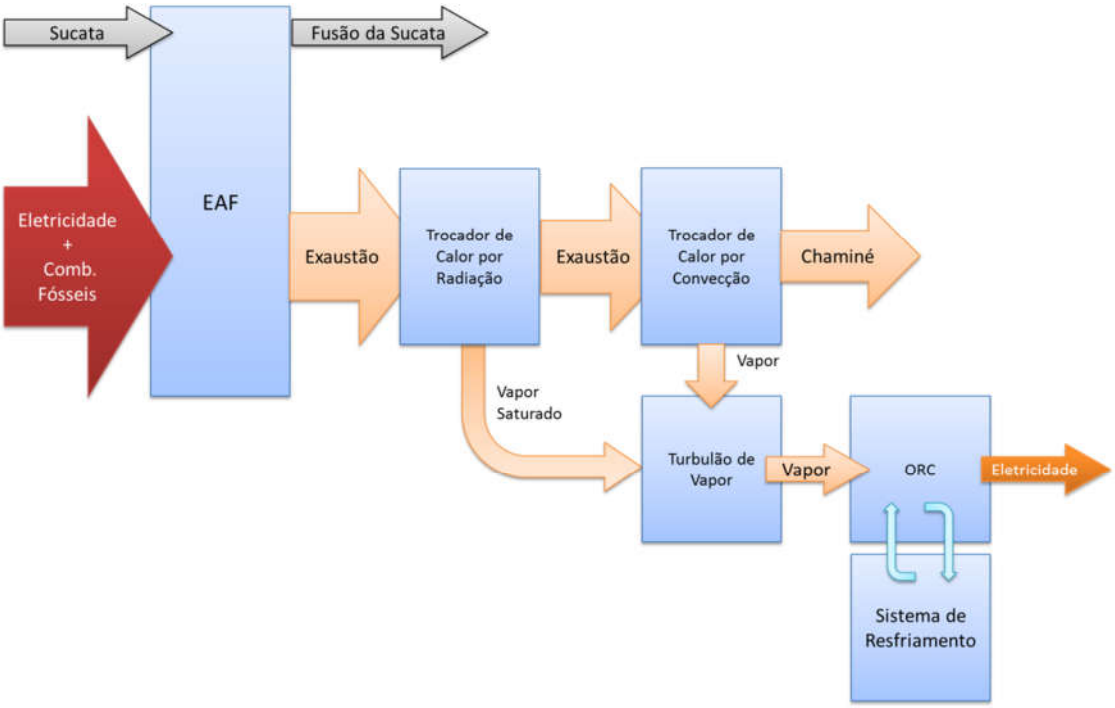


Figura 55 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC num forno de Arco Elétrico.

Fonte: (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

Na Europa, existem aproximadamente 200 fornos elétricos a arco, onde foi verificado um potencial de cerca de 400 MW de potencial em sistemas ORC. A Tabela 23 mostra os resultados do estudo de (HREII, 2013), para o potencial de WHR utilizando ORC na siderurgia europeia.

Tabela 23 - Estimativa de Geração [MW] via ORC na indústria europeia de Aço

País	Potência ORC em EAFs	Potência ORC em Aquec. Tarugo	Potência ORC Total
Itália	92,9	21,7	114,6
Alemanha	74,0	82,2	156,2
Espanha	85,5	25,6	111,3
França	43,1	30,1	73,3
Reino Unido	27,7	19,7	47,4
Bélgica	25,7	28,7	54,5
Áustria	4,2	12,2	16,5
Rep. Checa	0,8	9,2	10,0
Outros	83,3	81,0	164,3
Total	**437,5**	**310,5**	**748,0**

Fonte: (HREII, 2013)

3.5 – Vidros

O vidro é produzido a partir da fusão de sua matéria-prima, basicamente sílica, areia, carbonato de sódio e calcário, e de vidro reciclado (cullet), em fornos de diferentes tipos e tamanhos.

Os processos produtivos de vidro apresentam diferenças em função do tipo de produto desejado, mas as etapas de Preparação da Matéria-Prima, Fusão, Condicionamento e Formatação e Acabamento estão presentes em todas as fábricas de vidro, sendo também as etapas mais significativas em termos de consumo de energia.

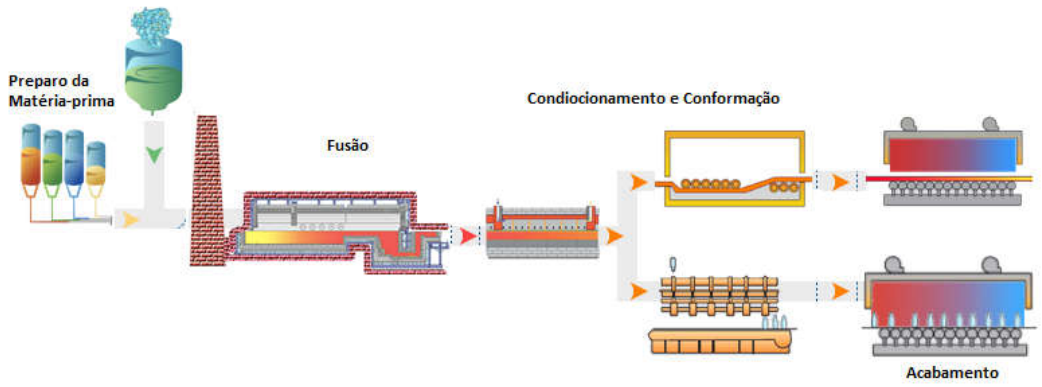


Figura 56 – Processo de Produção de Vidro.

Fonte: Baseado em (IIP, 2016)

Os fornos, responsáveis pela fusão da matéria-prima, podendo empregar combustão (ar/combustível ou oxicombustão), aquecimento elétrico ou ambos, são os equipamentos mais energo-intensivos da linha de produção dos vidros. A energia necessária para a fusão do vidro pode atingir 75% do total da energia demandada em todo o processo (IIP, 2016). Em geral, esses fornos operam com eficiências da ordem de 50% a 60%, onde as perdas de energia nos gases de exaustão representam entre 25% e 35% do total de perdas.

Apesar do mínimo teórico de energia para produção de vidros sodo-cálcicos ser de 2,8 GJ/tonelada e de 2,35 GJ/tonelada para vidro borosilicato e cristais, na prática o consumo de energia na produção de vidro varia entre 5,7 e 9,0 GJ/tonelada (IIP, 2016).

A intensidade energética em fornos de fusão apresenta grandes variações devido ao tipo e tecnologia dos fornos utilizados no processo bem como do produto final, que em sua maioria são: vidros para embalagens e vidros planos. O consumo energético na produção de vidros para embalagens na Europa e Estados Unidos varia entre 4 e 10 GJ/tonelada, enquanto para vidros planos é entre 5,0 e 8,5 GJ/tonelada (IIP, 2016).

3.5.1 – Caracterização da Indústria de Vidro Brasileira

O setor industrial de vidros brasileiro envolve um conjunto de produtos e tecnologias. A CNI (2010) faz a segmentação do setor de vidro em quatro subsetores em função do produto final fabricado: vidros planos, embalagem, doméstico e "vidros especiais/técnicos".

Esse setor caracteriza-se por uma grande participação de materiais reciclados, pois em termos teóricos o vidro é 100% reciclável, ou seja, uma mesma "unidade" de vidro pode ser aproveitada inúmeras vezes (CNQ, 2015). No ano de 2011, a reciclagem de vidro no país foi estimada em 47%, indicando um grande crescimento nas últimas décadas, uma vez que o índice em 1992 era de 15%. Entretanto, quando comparado com outros países observa-se ainda um grande potencial, dado que algumas nações obtêm taxas de reciclagem de até 96% (MME, 2016). Tal fato evidencia a carência brasileira de um sistema de coleta seletiva e logística reversa adequados, bem como a necessidade de políticas públicas que fomentem a reciclagem de vidro.

No ano de 2011, o Brasil atingiu um total de três milhões de toneladas de vidro produzidas, com faturamento da ordem de 5,5 bilhões de reais. A produção de vidros planos é a mais significativa, representando 51% da produção, enquanto a produção de embalagens representa 36% (MME, 2012).

3.5.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Vidro

A recuperação de calor residual para produção de eletricidade na indústria de vidro vem sendo aplicada em países europeus ao longo dos últimos dez anos (HREII, 2013).

A produção de vidro plano comtempla uma operação contínua, excedendo 8.000 horas anuais, sendo esse tipo de indústria um dos mais indicados para uso de recuperação de calor residual via ORC. A adoção de sistemas ORC em fábricas de vidro para embalagens é tecnicamente viável, apesar de não existirem referências em operação. Em geral, o potencial para produção de energia é inferior em unidades de produtoras de vidros

para recipientes, entretanto o volume de fábricas desse tipo pode ser consideravelmente superior às unidades de vidros planos (HREII, 2013).

Conforme mencionado, fornos para produção de vidros em geral utilizam gás natural como combustível, sendo os gases de exaustão resfriados para serem direcionados ao processo de tratamento (quenching towers, precipitadores eletrostáticos, filtros de manga, etc.). Dessa forma, o sistema ORC pode fazer uso dessa energia, normalmente desperdiçada no resfriamento dos gases de exaustão, para produção de eletricidade.

Os trocadores de calor utilizados no setor de vidros apresentam projetos especiais com sistemas de limpeza automatizados, como destacado por FORNI*, et al.*, (2014). Ao seguir o fluxograma de Figura 57, o sistema de resfriamento é bypassado, e, caso qualquer problema seja verificado no trocador de calor utilizado na recuperação, o fluxo dos gases de exaustão é novamente redirecionado para o sistema de resfriamento. Em alguns casos, a adição de um ventilador antes da chaminé pode ser necessária para garantir a vazão correta no sistema de tratamento de gases em caso de grandes perdas de carga no trocador de calor.

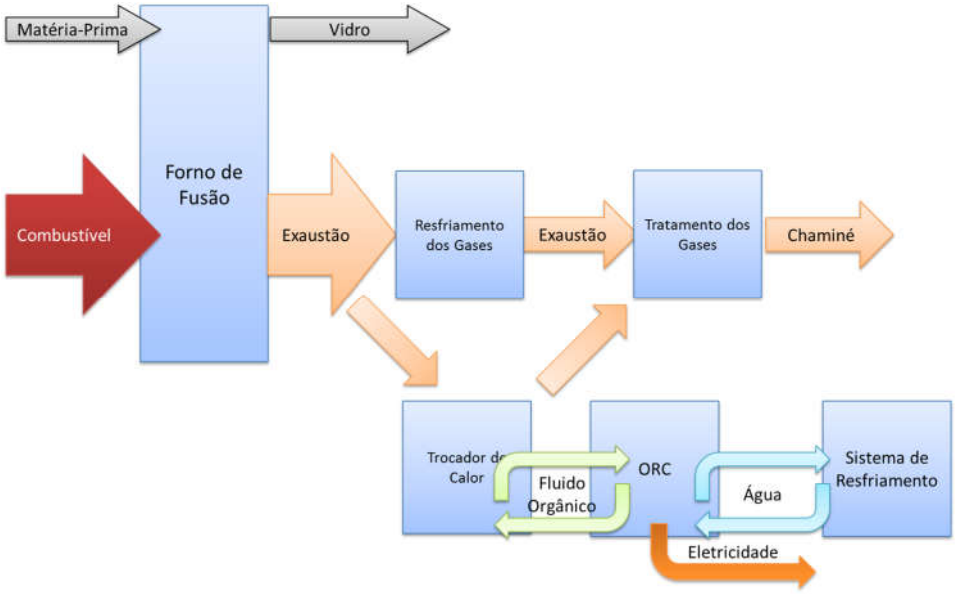


Figura 57 - Fluxograma de produção de eletricidade via ORC em forno de fusão de Vidros.

Fonte: Baseado em (FORNI, CAMPANA E DI SANTO, 2014)

O estudo do potencial europeu para geração de eletricidade via ORC em fábricas do continente estimou um potencial de 80 MW distribuídos por 60 fábricas de vidro plano, conforme mostrado na Tabela 24.

Tabela 24 - Estimativa do potencial de geração de energia elétrica em fábricas de vidro plano na Europa.

Capacidade de Produção [t/dia]	Potência do ORC [kW]	Número de Fábricas	Potência Total ORC [MW]
350	1040	1	1,0
475	1040	22	22,9
625	1500	28	42,0
750	1800	7	12,6

Fonte: (HREII, 2013)

3.6 – Alumínio

A indústria de alumínio é composta pelo processo de mineração de bauxita até a produção de produtos transformados de alumínio. A bauxita é um minério com alto teor de alumínio que, após extraído, é direcionado para a etapa de refino, onde se produz a alumina. A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina e, a partir do alumínio primário, é possível fazer as transformações necessárias para o seu uso final por diversas indústrias como de construção civil e transportes, conforme mostrado na Figura 58 (ABAL, 2017).

O processo de redução para produção de alumínio primário consiste na extração do oxigênio da alumina através da eletrólise. O processo de eletrólise produz dióxido de carbono e fluoretos na forma de gases, sendo que esses gases de exaustão devem ser removidos antes da emissão à atmosfera.

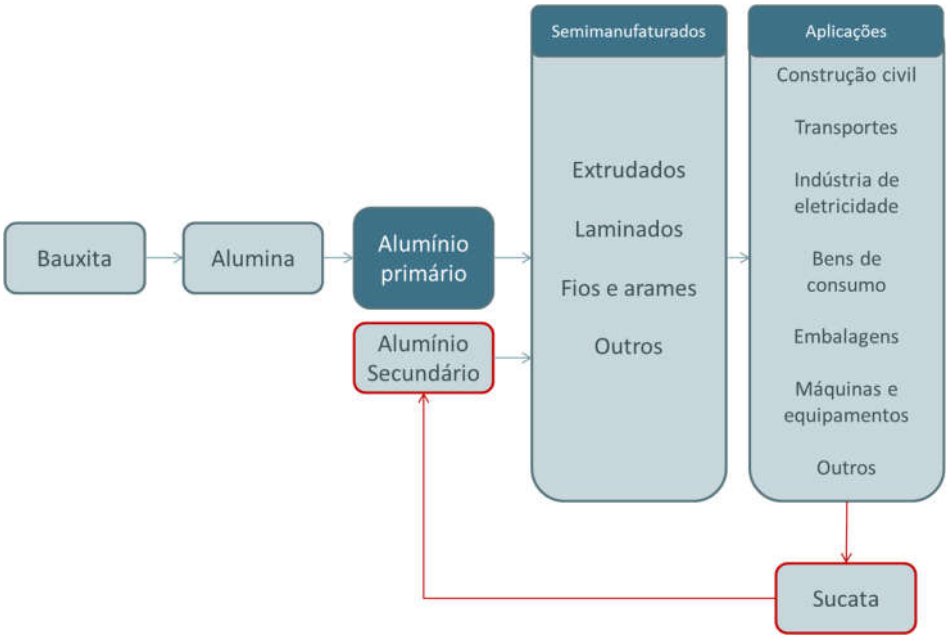


Figura 58: Cadeia de produção do alumínio

Fonte: Elaboração própria a partir de CNI (2012)

As unidades de redução da alumina podem ser divididas em dois tipos principais em função do sistema de anodos. O anodo é um bloco de carbono feito de coque de petróleo e piche, sendo o diferencial entre as tecnologias a maneira como esse bloco de carbono é produzido.

Nos sistemas prebake o coque de petróleo é misturado com piche, que age como um envoltório. Então, essa mistura é compactada em um formato de paralelepípedo e inserida nos fornos de maneira a ser transformado em um bloco sólido. Uma corrente elétrica é direcionada ao bloco por hastes. Nos fornos prebake existe um conjunto de anodos que permanecem no forno durante alguns dias (cerca de 30), e após serem completamente consumidos são removidos.

Em fornos Soderberg, o conceito é eliminar as etapas de cozimento e junção do bloco de carbono com a haste. A célula Soderberg possui um único anodo maior, sendo caracterizado por menores eficiências da transmissão da corrente elétrica e demandando maiores tensões, produzindo mais calor e perdas.

3.6.1 – Caracterização da Indústria de Alumínio Brasileira

A produção de alumínio primário no Brasil vem se reduzindo ao longo da última década. Após constante crescimento até 2008 a produção apresentou uma estabilização entre os anos de 2009 e 2013, e posteriormente, quedas bruscas na produção em 2014 e 2015, devido ao aumento dos custos da energia elétrica no país e maior ganho de competitividade dos produtos chineses (ABAL, 2017).

No ano de 2016, a produção de alumínio atingiu 792 mil toneladas, resultando em um aumento de 2,7% indicando uma estabilização após as quedas de 2014 e 2015. A Figura 59 mostra o histórico de produção de alumínio no país.

Ademais, o Brasil possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo, sendo o quarto maior produtor mundial (USG, 2017), concentrada nos estados do Pará e em Minas Gerais (ABAL, 2017).

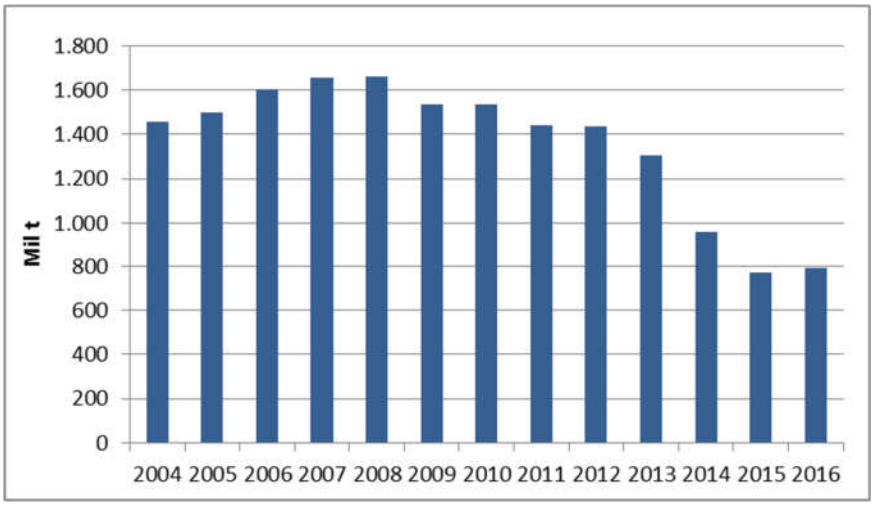


Figura 59: Produção de alumínio primário no Brasil (2004-2016)

Fonte: (ABAL, 2017)

A indústria de alumínio possui como característica alta concentração de mercado, tanto no mundo como no Brasil. No país, uma única companhia (Mineração Rio do Norte

– MRN) é responsável por 50% da produção de bauxita nacional, enquanto a Hydro Alunorte é a maior produtora de alumina do Brasil. A Figura 60 mostra a localização da cadeia de produção de alumínio no país.

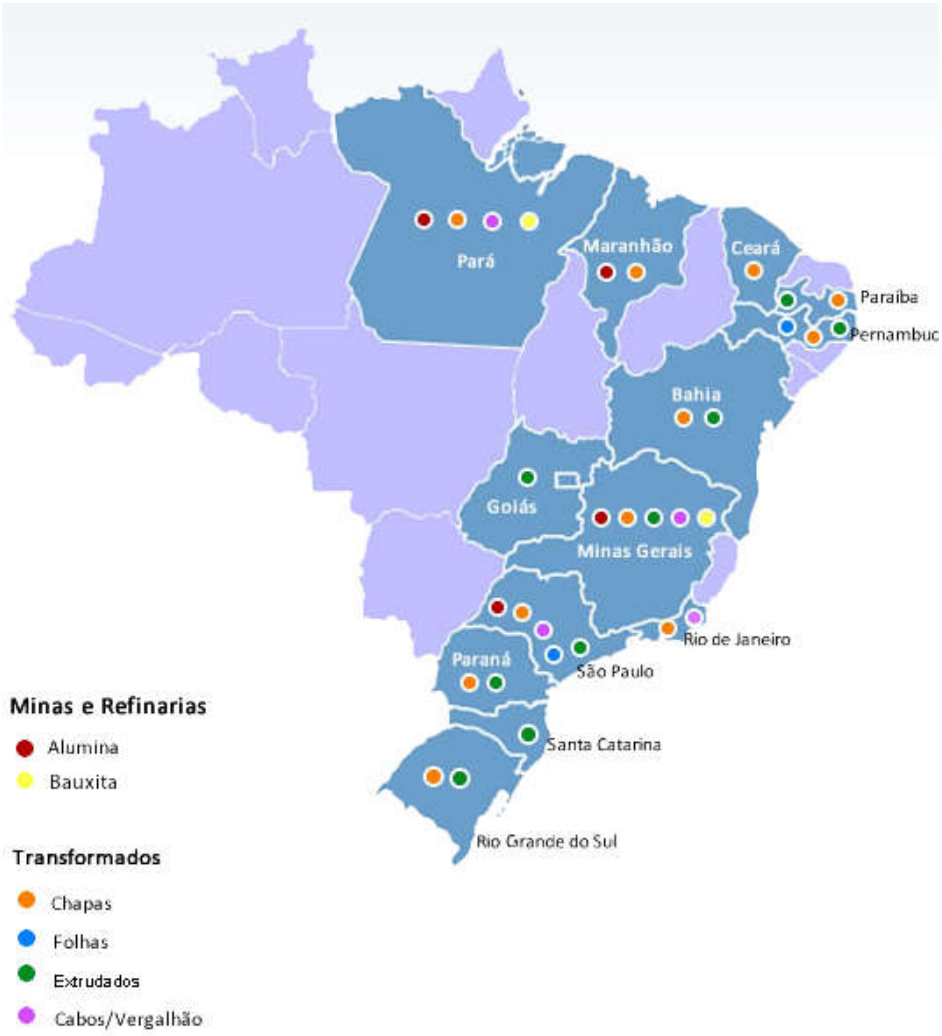


Figura 60: Localização da cadeia produtiva de alumínio no Brasil

Fonte: (ABAL, 2017)

Na produção de alumínio primário, destacam-se a Albras e a CBA, com produções de 435 e 302 mil toneladas, respectivamente em 2015. Essas empresas representam atualmente a totalidade de produção de alumínio no Brasil, pois, conforme já citado,

devido aos aumentos de preços da tarifa de eletricidade no país, companhias como a Alcoa, BHP Billington e Novelis suspenderam suas operações (ABAL, 2017).

Entretanto, apesar do complexo panorama da indústria brasileira de alumínio, a grande reserva comprovada de bauxita no país incentiva a instalação de novas unidades para processamento da matéria prima (alumina), embora o cenário ainda seja complicado para a produção de alumínio primária devido ao seu processo eletro-intensivo.

A participação da tecnologia Soderberg na produção de alumínio primário no Brasil é de 40% do total, e a participação da tecnologia Prebake (ou anodos pré-cozidos) de 60%. O consumo específico da tecnologia Soderberg no Brasil é em média 59,76 GJ de energia elétrica por tonelada de alumínio primário, e o consumo específico da tecnologia Prebake 51,55 GJ de energia elétrica por tonelada de alumínio primário produzido (ABAL, 2011). Observa-se que o setor de alumínio no Brasil segue a tendência mundial de utilizar mais a rota com menor consumo energético, isto é, mais eficiente, apesar de a proporção de Prebake estar ainda consideravelmente inferior à proporção média mundial (ABAL, 2011).

3.6.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Alumínio

O consumo dos *smelters* de alumínio atinge cerca de 13 MWh de eletricidade por tonelada de alumínio gerada, onde aproximadamente metade da energia é perdida como rejeito térmico, porém, apesar da abundante disponibilidade de calor, a integração térmica nas fábricas de alumínio ainda é limitada (NOWICKI e GOSSELIN, 2012). Isso ocorre principalmente devido à baixa qualidade do rejeito e à distância das fontes quentes até os pontos de demanda de calor.

Os gases de exaustão produzidos durante a redução do alumínio são coletados por dutos no topo das células de redução e transportados para um sistema de tratamento de gases antes de seu descarte na atmosfera. A exaustão carrega em torno de 3 MWh de calor por tonelada de alumínio produzida, representando aproximadamente 770.000 MWh/ano ou 88 MW de perdas de calor contínuas. Na prática a temperatura dos gases na exaustão

varia dependendo da temperatura ambiente do ar, sendo de aproximadamente 100°C a 120 °C (NOWICKI e GOSSELIN, 2012).

A recuperação de calor antes do tratamento dos gases permite acesso a temperaturas mais elevadas e o resfriamento dos gases é algo benéfico para o processo tratamento dos mesmos. Entretanto, como elementos contaminantes e partículas podem estar presentes nos gases antes de seu tratamento, os trocadores de calor devem ser projetados para operar com certos níveis de fouling. Segundo NOWICK e GOSSELIN (2012), é razoável que até de 40 MW térmicos possam ser recuperados na exaustão de dos sistemas de redução de alumina em uma unidade com capacidade produtiva de 270.000 toneladas de alumínio ao ano.

No processo de laminação, estima-se que calor de temperaturas mais elevadas esteja disponível nos chamados "*holding furnaces*". O alumínio derretido chega à etapa de laminação a temperaturas muito elevadas para o processo (cerca de 860°C), sendo deixado para resfriar até atingir a temperatura de 720 °C. Durante essa etapa, as portas da fornalha de laminação são deixadas abertas, sendo a maior parte do calor dissipada diretamente para a atmosfera e não para as chaminés. Estima-se que durante esse período de espera para o resfriamento, cerca de 0,05 MWh por tonelada de alumínio seja dispersado. Após atingida a temperatura para o processo de moldagem as portas são fechadas e o processo é iniciado. Durante a moldagem, queimadores são utilizados de maneira intermitente mantendo a temperatura do processo. Durante essa queima grandes taxas de calor são produzidas e transportadas pelos gases de exaustão diretamente para as chaminés. Estima-se que a temperatura dos gases na base da chaminé atinja 600°C, indicando calor de alta qualidade para recuperação (NOWICKI e GOSSELIN, 2012).

A Figura 61 mostra os pontos de disponibilidade e de demanda de energia térmica em uma fábrica de alumínio de capacidade de 270.000 toneladas de alumínio ao ano.

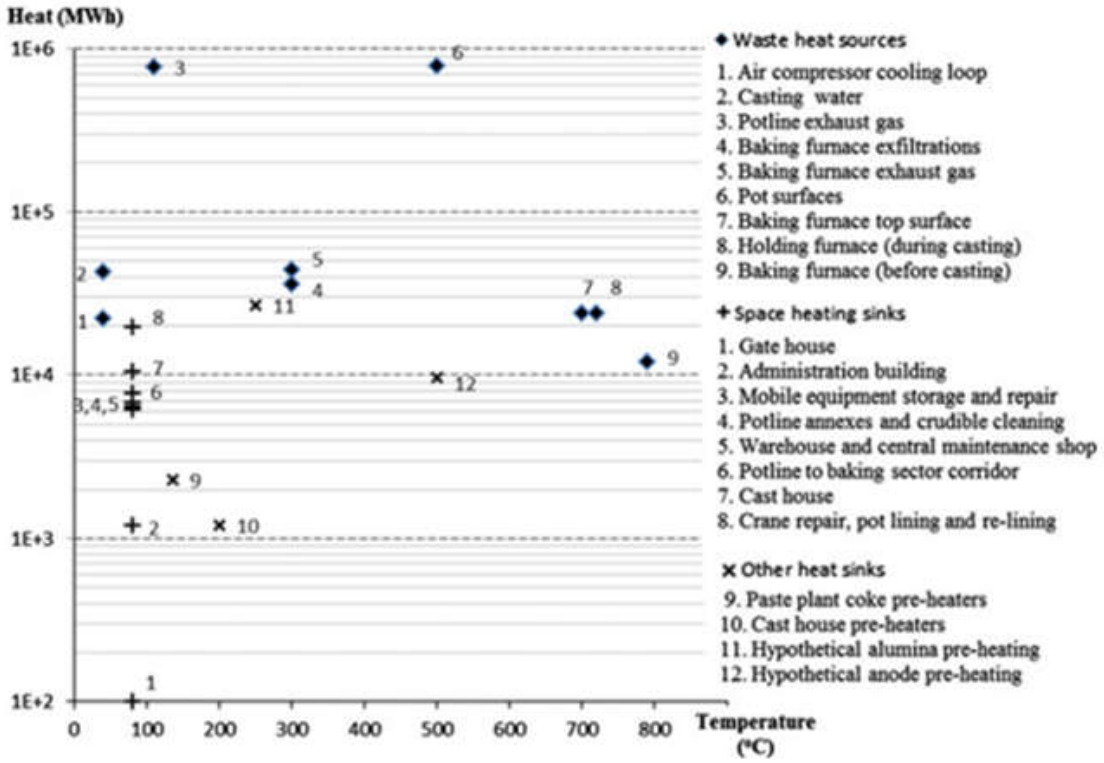


Figura 61 – Pontos de disponibilidade e demanda de energia térmica na produção de alumínio, mapeados por (NOWICKI E GOSSELIN, 2012)**.**

3.7 – Cerâmica

O setor cerâmico constitui um grande demandante de substâncias minerais naturais e beneficiadas, e congrega dois segmentos específicos, o de Cerâmica Vermelha, também chamada Cerâmica Estrutural, empregando as argilas de cor avermelhada, e o de Cerâmica Branca, empregando uma ampla gama de insumos minerais, inclusive as argilas avermelhadas, aglutinando diversos subsegmentos.

Um dos diferenciais determinantes entre a cerâmica vermelha e a branca ocorre quanto aos insumos energéticos nos processos de produção. Tanto na parcela térmica, como na parcela elétrica para acionamento mecânico, controle e iluminação, os processos envolvidos na cerâmica branca são mais intensivos, com alguma variação entre cada

subsegmento, em relação aos processos da cerâmica vermelha, o que interfere nos custos de produção.

Em geral a indústria de cerâmica branca constitui um processo químico, onde as matérias-primas são submetidas a transformações, sendo adquiridas novas propriedades em cada etapa, ou alteradas suas características físico-químicas, até se obter o produto final. O processo na cerâmica branca apresenta maior complexidade, já que exige rigoroso controle de matérias-primas e das curvas de queima. Mesmo existindo no Brasil processos bastante variados conforme do tipo de produto, pode-se constatar a existência de três etapas fundamentais de processamento, sendo elas: preparação das matérias-primas, conformação dos produtos (extrusão, torneamento, prensagem e fundição) e processamento térmico (secagem e queima).

No processo de produção das indústrias de cerâmica vermelha o consumo de energia térmica é o mais representativo, promovido pelo uso de combustíveis nos processos de queima nos fornos e em eventuais fornalhas de sistemas de secagem. O consumo de energia elétrica se concentra nas etapas de processamento mecânico da massa cerâmica (desintegração, mistura, laminação, extrusão, corte e movimentação), para acionamento mecânico (incluindo o acionamento de exaustores e ventiladores), e iluminação (SCHWOB, 2012).

3.7.1 – Caracterização da Indústria Cerâmica Brasileira

A indústria cerâmica no Brasil constitui um dos maiores aglomerados industriais do gênero no mundo, possuindo uma participação no PIB nacional, da ordem de 1,0%. O setor engloba micros, pequenas, médias e grandes empresas em todos os estados, tanto no interior como em regiões metropolitanas, cobrindo muitos municípios no país (INT, 2012). Os produtos incluem artigos variados para a construção civil, como elementos estruturais e para revestimento, louças sanitárias, além de louças de mesa e de decoração, assim como de uso específico, como isoladores elétricos, tijolos refratários, abrasivos, biocerâmica e isolantes térmicos.

As unidades industriais de produção cerâmica apresentam uma grande amplitude de atuação no ramo de produtos de minerais não-metálicos da indústria de transformação, com uma considerável quantidade de distintos segmentos, em função da diversidade de matérias-primas e processos, assim como das propriedades e destinação dos produtos fabricados.

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil, também denominada cerâmica estrutural, envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais e de vedação, tubos, lajotas e pisos). Esta indústria tem uma participação de 0,5% do PIB nacional (ANICER, 2012), representando parcela importante da indústria de materiais de construção civil.

Segundo a ANICER (2012) o faturamento anual do setor em 2012 foi da ordem de R$ 18 bilhões, envolvendo a participação de 6.903 empresas, na maior parte micro, pequenas e médias empresas de origem familiar, e a oferta de 293 mil empregos diretos (média de 42,4 empregados por empresa) e outros 1,25 milhões de empregos indiretos, constituindo assim um dos maiores parques de produção de cerâmica vermelha no mundo.

No segmento produtivo da cerâmica estrutural no Brasil ainda predomina em muitas regiões o perfil de empresas com estruturas gerenciais arcaicas, caracterizada por: baixo percentual de reinvestimento, baixa velocidade de atualização, modernização restrita, baixa incorporação de inovações, evidenciando, em geral, um processo de avanço tecnológico lento e defasado em relação a outros segmentos do setor da construção civil. As dificuldades de colocação em prática de um modelo adequado de gestão têm levado muitas empresas a se aproximarem da informalidade (INT, 2012).

Quanto à cerâmica branca no Brasil, apesar de configurar um caso de sucesso, explorando uma boa condição de oferta interna de insumos (matéria-prima de qualidade, gás natural e mão de obra capacitada), que vem permitindo explorar o forte crescimento da demanda do mercado interno, tem, por outro lado, sofrido uma crescente concorrência econômica de países como a China, limitando sua grande potencialidade de concorrência no comércio exterior.

O setor cerâmico, considerando tanto a produção de cerâmica branca e vermelha, produziu em 2012, em torno de 106.700 milhões de toneladas de produtos, como mostrado na Tabela 25. Nota-se que a produção de cerâmica vermelha representa perto

de 85% da produção total. Consequentemente as demandas de energia deste segmento são as de maior peso, representado respectivamente, 75 e 70% da demanda térmica e elétricas totais. Isso ocorre mesmo diante de consumos específicos de energia mais elevados para a produção de cerâmica branca, cujos valores são quase o dobro para a parcela térmica e quase três vezes maior para a parte elétrica.

TABELA 25: PRODUÇÃO, DEMANDAS DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA E CONSUMOS ESPECÍFICOS DO SETOR CERÂMICO EM 2012.

Sub segmentos	Produção (10^6 t/ano)	Demanda Térmica 10^3 tep/ano	Demanda Elétrica TWh/ano	Consumo Específico de Combustíveis kcal/kg	Consumo Específico de Eletricidade kWh/t
C. Branca	15,578	1.827,11	1,262	1.172	81,0
C. Vermelha	91,144	5.988,16	3,053	657	33,5
Total	106,722	7.815,27	4,315	732	40,0

Fonte: (INT, 2012)

Quanto ao consumo específico de energia térmica, a média ponderada geral do setor cerâmico (732 kcal/kg) se aproxima da média geral do segmento de cerâmica vermelha (657 kcal/kg) em função da participação mais representativa deste na produção total do setor como um todo. Por sua vez, envolvendo processos em temperaturas mais elevadas e com maiores especificidades e exigências, a cerâmica branca possui uma demanda específica média de energia térmica (de 1.172 kcal/kg) bastante superior à da cerâmica vermelha. Os valores médios de consumo específico de eletricidade, como mostrados na Tabela 22 são de 81 kWh/t para a cerâmica branca e de 33,5 kWh/t para cerâmica vermelha, que resultou em 40 kWh/t para todo o setor (INT, 2012).

3.7.2 – Recuperação de Calor na Indústria de Cerâmica

O layout das fábricas de cerâmica é um aspecto fundamental para a verificação da disponibilidade de calor, uma vez que muitos produtores fazem uso de processos de secagem que utilizam o calor da exaustão dos fornos de produção, podendo em alguns casos possuir queima suplementar para aumentar a velocidade do processo de secagem (TANGRAM TECHNOLOGY , 2010). Dessa forma, a recuperação de calor deve ser considerada apenas após a otimização da integração entre o forno e a secagem, o que minimiza a quantidade de calor disponível para recuperação. A Figura 62 ilustra os pontos de rejeito de energia num forno túnel para produção de cerâmica.

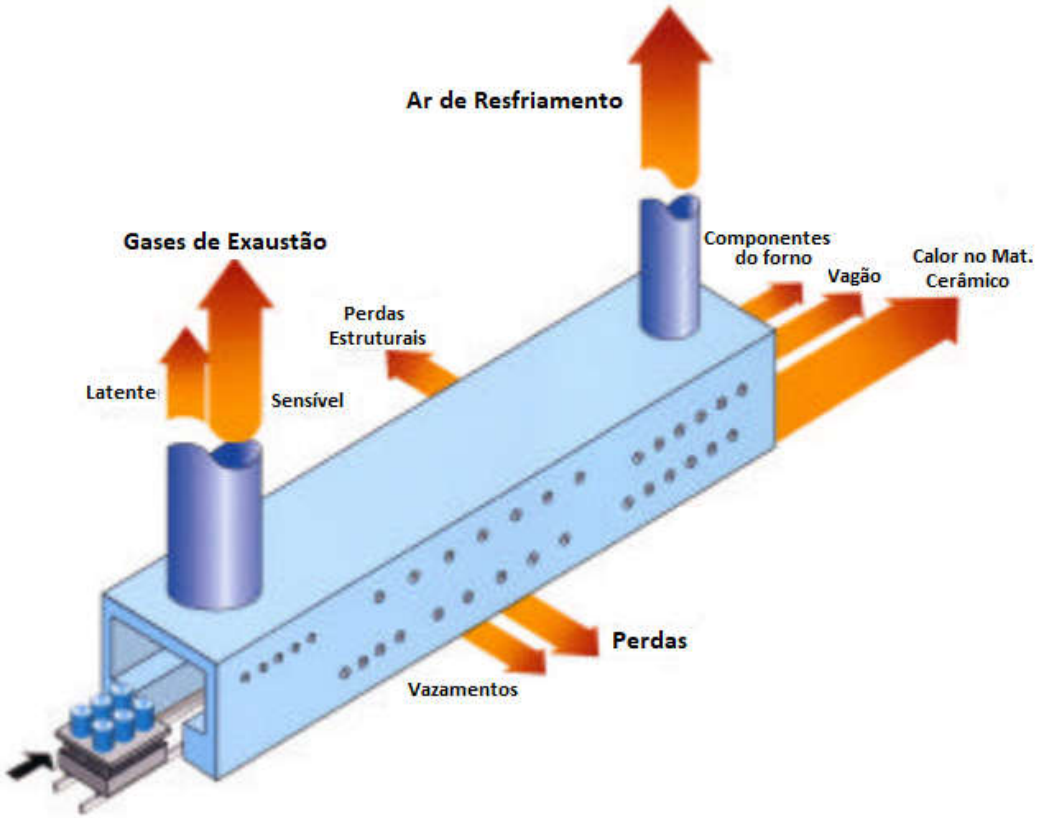


Figura 62 – Perdas de Energia num forno túnel da indústria de cerâmica.

Fonte: Adaptado de (TANGRAM TECHNOLOGY , 2010)

Os seguintes pontos são cruciais para a análise de recuperação de calor em processos de produção de cerâmica:

- A operação do forno nunca deve ser comprometida para a produção de calor para outro processo.
- A prioridade deve ser sempre recuperar o calor para o uso no próprio forno, como pré-aquecimento da carga. Posteriormente, deve-se analisar disponibilidade de calor para a secagem, para apenas depois considerar outra utilidade para essa energia.

A energia térmica no ar de resfriamento costuma indicar disponibilidade de calor residual para recuperação. Estes gases são limpos e em altas temperaturas devido à sua proximidade aos queimadores do forno.

No estudo realizado por PERIS, *et al.* (2015), um trocador de calor foi acoplado à saída ar de resfriamento do forno, onde um fluido térmico é aquecido até a temperatura de 165°C e direcionado até um sistema ORC para produção de eletricidade, gerando cerca de 120 kW. Os resultados obtidos no estudo são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados de um ORC em forno para produção de cerâmica.

Produção de Eletricidade Anual [kWh]	120886
Consumo de Energia da Bomba [kWh]	5611
Energia Líquida Gerada [kWh]	115275
Horas de Operação Anuais [h]	8016
Custo da Eletricidade [Euro/kWh]	0,1246
Economia pela Energia Gerada [Euros]	14363
Custo de Manutenção [Euros]	1200
Fluxo de Caixa no Ano 1 [Euros]	13163
Investimento [Euros]	60000
VPL [Euros]	138286
TIR (a.a.)	22,80%
Payback [anos]	4,63

Fonte: (PERIS, NAVARRO-ESBRÍ, *ET AL.*, 2015)

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO: ESTUDOS DE CASO DE RECUPERAÇÃO DE CALOR NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

4.1 – Introdução

O presente capítulo tem como objetivo analisar uma aplicação real de recuperação de calor para produção de eletricidade via ORC nos subsetores industriais estudados nesta tese, são eles:

- Química
- Cimento
- Ferro-Gusa e Aço
- Vidros
- Alumínio
- Cerâmica

Para isso, foi realizada uma pesquisa de campo visando coletar informações de fontes de calor industriais onde os sistemas ORC poderiam se mostrar viáveis. A partir dos dados de operação das unidades industriais, calculou-se a disponibilidade de calor para recuperação.

Fazendo uso do insumo térmico calculado, partiu-se para o equacionamento descrito no Capítulo 3 para calcular as características termodinâmicas do ciclo ORC e seu desempenho, determinando assim a saída de potência.

Para cálculo das propriedades termodinâmicas, utilizou-se o software comercial REFPROP do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) combinado a uma planilha Excel ajustada especificamente para cada estudo de caso.

Posteriormente, fez-se uso das informações de custos apresentadas no Capítulo 2 combinadas à consulta direta aos fornecedores de equipamento, para a realização de uma simulação de viabilidade econômica do empreendimento, buscando apresentar o retorno financeiro esperado para a indústria.

Devido às incertezas de estimativa de alguns custos e sua alta amplitude de variação, para todos os estudos de caso foram criadas três situações, uma otimista com menores custos, uma pessimista com os maiores custos e a média entre ambas.

Para os custos de investimentos foram utilizadas informações de um fabricante para o valor do módulo ORC (TURBODEN, 2013). No caso dos os custos dos sistemas auxiliares foram orçados valores típicos de tubulação e bombas, um circuito de água de refrigeração e torres de arrefecimento. O custo do trocador de calor é o mais complexo de ser obtido, pois necessita de um elaborado projeto para cada aplicação, visando seu correto dimensionamento e orçamento, portanto foi estimado um valor de acordo com a experiência de profissionais da área, sabendo-se que o mesmo está sujeito a uma grande variação. Os custos de estrutura e instalação foram estimados conjuntamente com a empresa TERMOSERVICE (2013).

Deve-se ressaltar que, como nenhum projeto foi desenvolvido em detalhes, todos os valores calculados nesse trabalho estão sujeitos a incertezas e podem variar além da amplitude aqui analisada. Apenas após a elaboração detalhada e execução de um projeto semelhante no Brasil esses valores poderão ser mais precisos.

Por último, algumas premissas fundamentais foram consideradas iguais em todos os estudos de caso, são elas:

- O calor disponível médio calculado nas fontes quentes não varia ao longo dos anos;
- Todo o capital investido é próprio (sem empréstimos e endividamento), sendo assim, a taxa de retorno do investimento é considerada “não alavancada”;
- O modelo econômico não considera inflação;
- Preço médio da eletricidade industrial a 300 R$/MWh[9].
- Projeto de 20 anos onde nenhum equipamento é trocado nesse período;
- Amortização e depreciação não foram contabilizadas.

---

[9] Valor da Eletricidade Média para a indústria nacional é de 329 R$/MWh, segundo relatório da (FIRJAN, 2011). Considerou-se no estudo um valor 10% abaixo para manter uma premissa ainda mais conservadora. Valores também verificados em (COMERC, 2017) e (TRADENER, 2017). A variação do preço da eletricidade será realizada posteriormente em uma análise de sensibilidade.

- Um valor de 10% do custo total de investimento é acrescentado para o gerenciamento do projeto e eventuais contingências[10].
- Perda de 15% do calor disponível na fonte até a alimentação do ORC. Tais perdas são consideradas devido à necessidade da transferência de calor da fonte quente para um circuito intermediário (*heat carrier*) para então a realização da troca de calor no evaporador do ORC[11].
- Perda de 20% do calor disponível na fonte quente no caso da Siderurgia, devido às características operativas de uma das fontes quentes (EAF) [10].
- Temperatura máxima de resfriamento do exausto de 130ºC, exceto quanto limitado por equipamentos à jusante[12].

Os tributos utilizados e os valores para conversões cambiais são exibidos na Tabela 27. Entretanto, apesar de o modelo financeiro estar adaptado para o cálculo dos tributos incididos na venda da energia, os mesmos não são aplicados, uma vez que se considera que a energia gerada seria consumida pela própria indústria, não sendo comercializada na rede, logo não estaria sujeita à incidência de impostos.

Tabela 27 – Taxas consideradas.

Taxa de Importação	2%
PIS	0,65%
COFINS	3,00%
IR Base	8,00%
IR Taxa (<240k)	15,00%
IR Taxa(>240k)	25,00%
CSLL Base	12,00%
CSLL Taxa	9,00%
ICMS Base de Cálculo	1,20
ICMS Valor	12%
Taxa de Câmbio (Euro para USD)	1,14
Taxa de Câmbio (BRL para USD)	3,29

[10] Dentro desses valores são considerados os custos de eventuais licenciamentos, sondagens e terraplanagens, segurança industrial, descarte de resíduos da obra e montagem e outros custos emergenciais não determinados previamente.

[11] A variação da temperatura e vazão da fonte quente em função das condições operativas dos fornos faz com que os trocadores de calor estejam operando constantemente fora de seus pontos de projeto, indicando que quanto mais variável for as condições termodinâmicas da fonte de calor, maiores serão as perdas (VESCOVO, 2009).

[12] A temperatura de 130ºC garante que não haverá condensação de elementos corrosivos no trocador de calor e na descarga para o ambiente (GANAPATHY, 2003).

O imposto de importação utilizado foi de 2%, uma vez que se assumiu que o produto seria importado como tecnologia inovadora de geração de energia ainda não fabricada no país, se encaixando em linhas de subsídios governamentais (BNDES, 2016).

Finalmente, cabe ressaltar que as análises exergéticas realizadas para os estudos de caso foram feitas considerando um modelo hipotético de sistema ORC, uma vez que os fabricantes não fornecem as informações específicas necessárias para a simulação de suas máquinas.

4.2 – Estudo de Caso: Química

O estudo de caso selecionado para o setor químico no Brasil foi uma unidade de produção de negro-de-fumo (carbon black), atendendo os mercados de pneus, borracha, plásticos e tintas.

4.2.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

Segundo as informações da equipe de engenharia da empresa, três fontes de calor poderiam ser analisadas para a produção de eletricidade, devido à sua proximidade e características termodinâmicas. São elas:

- Fonte de Calor 1: Gases de Exaustão da unidade de produção de negro-de-fumo 1 (*Smoke stream 1*)
- Fonte de Calor 2: Gases de Exaustão da unidade de produção de negro-de-fumo 2 1 (*Smoke stream 2*)
- Fonte de Calor 3: Calor proveniente dos secadores 1 e 2 (*Dryer 1 & 2*)

Sendo as condições termodinâmicas das fontes de calor detalhadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Dados das Fontes de Calor

Parâmetro	Fonte 1	Fonte 2	Fonte 3
Vazão Volumétrica [Nm^3/h]	33,590	35,695	23,945
Temperatura [°C]	600	600	400
Pressão (atm.)	1	1	1
Temp. Mín. Resfriamento [°C]	180	180	180

A energia térmica disponível nessas fontes pode ser recuperada através de trocadores de calor, conforme a configuração que será discutida na próxima seção. Primeiramente, deve-se determinar o calor disponível para o dimensionamento da unidade de potência.

Com a composição média dos gases fornecida nas amostragens da unidade é apresentada na Tabela 29.

Tabela 29 – Composição Química média da fonte quente.

Elemento	%
CO_2	2,0
N_2	38,0
O_2	2,0
H_2O	40,0
CO	8,0

Com as informações do estado termodinâmico das fontes quentes apresentado na Tabela 28 e a composição química da Tabela 29 é possível determinar a entalpia e vazão mássica e, consequentemente, calcular a quantidade de energia térmica disponível nas fontes, que resulta em aproximadamente 13,3 MW térmicos.

4.2.2 – Sistema Proposto

Visando aproveitar a energia disponível nas três fontes quentes mencionadas anteriormente, foi proposta a configuração apresentada na Figura 63, onde um fluido térmico (ex: Therminol) é utilizado como vetor de transferência de energia entre as fontes e o evaporador do ciclo Rankine orgânico. Os trocadores de calor utilizados podem ser de tubo e carcaça, como os apresentados na Figura 64, sendo a vazão de fluido térmico controlada por uma válvula na entrada de cada trocador de calor.

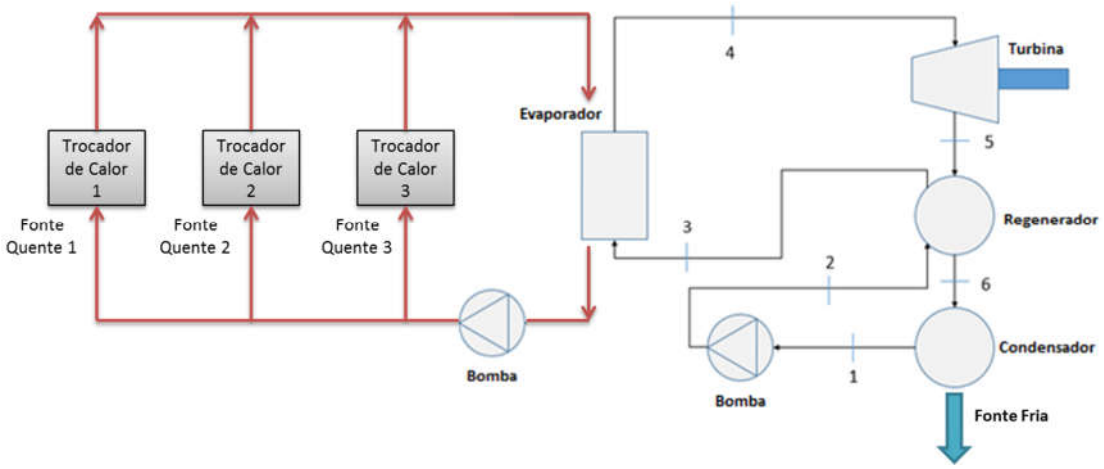


Figura 63 - Configuração do Sistema ORC Proposto para o Estudo de Caso

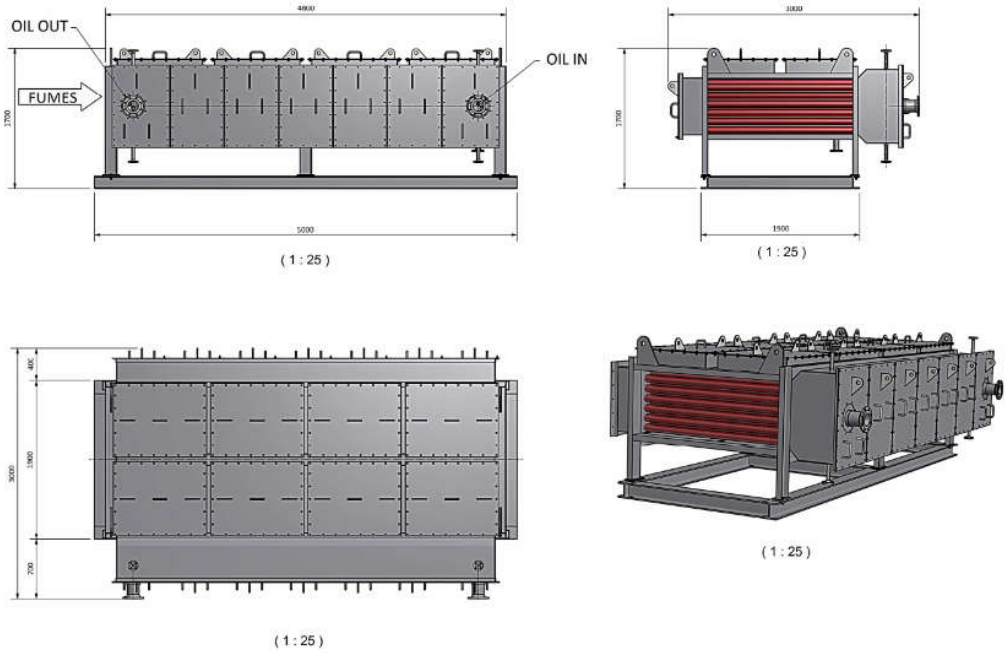


Figura 64 - Exemplo de Trocador de Calor para aquecimento do óleo térmico que será direcionado ao sistema ORC.

4.2.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC

O estudo do comportamento termodinâmico do ciclo Rankine orgânico proposto foi realizado através do equacionamento proposto no Capítulo 2, visando determinar o estado termodinâmico de cada ponto do ciclo, o trabalho de eixo gerado e consequentemente a eficiência termodinâmica obtida.

Apesar dos fabricantes de ORCs utilizarem diferentes fluidos e, em alguns casos, composições de fluidos com aditivos, para esse estudo de caso foram considerados quatro diferentes substâncias, baseados na classificação de CHEN *et al.* (2010):

- Ciclopentano, Pentano e R245fa: fluidos secos (inclinação negativa na curva de saturação no diagrama T-s)
- R123: fluido isentrópico (fluido com inclinação vertical na curva de saturação do diagrama T-s).

Para cada fluido foi realizada a análise de dois parâmetros fundamentais para o ciclo, a vazão do fluido de trabalho e a razão de pressão na bomba do ORC. Tais variáveis foram escolhidas devido ao seu impacto considerável no comportamento termodinâmico do sistema, sendo considerados parâmetros-chave na simulação. Ademais, a vazão mássica é um elemento fundamental no controle de potência do sistema ORC.

Entretanto, esses elementos devem respeitar determinados limites para garantir que nenhuma lei termodinâmica seja quebrada. Logo, quatro testes são realizados sempre que o modelo termodinâmico é executado. Considerando a nomenclatura apresentada na Figura 63, os testes fundamentais são:

- O estado 5 deve ser sempre vapor superaquecido;
- O estado 4 deve estar abaixo das condições supercríticas do fluido;
- A temperatura no estado 5 deve ser sempre superior à temperatura no estado 3 (permitindo a existência do regenerador);
- O estado 6 sempre será vapor superaquecido (evitando a formação de mistura).

Caso algum dos testes não seja respeitado a simulação retorna “0” para todos os valores de eficiência energética e exergética, indicando que o sistema é inviável.

Para a realização dos cálculos termodinâmicos, um conjunto de entradas deve ser fornecido ao modelo. Os parâmetros de entrada relativos às perdas do sistema são aqueles considerados na Tabela 30.

Tabela 30 - Parâmetros de Entrada para a simulação do ciclo ORC

Parâmetro	Valor
Perdas de Energia no Regenerador	5%
Perdas de Energia na Fonte Quente	5%
Razão de Pressão da Bomba	Variável 1
Eficiência Isentrópica da Bomba	95%
Queda de Pressão no Evaporador	5%
Queda de Pressão no Regenerador	5%
Vazão Mássica do Fluido de Trabalho	Variável 2
Eficiência Isentrópica da Turbina	85%

Ademais, fixou-se as condições termodinâmicas do estado 1 (40°C ou 20°C – vide **Tabela 31** – e 300 kPa), conforme mencionado na descrição da modelagem apresentada no Capítulo 2. Logo, de maneira a evitar que a o sistema apresente um valor de T_3 maior do que T_2 , a variação de temperatura no regenerador ΔT_{regen} foi determinada como 80 °C.

Tabela 31 – Temperatura no ponto 1 para os diversos fluidos analisados

Fluido	T_1
Ciclopentano	40 °C
R123	20 °C
R245fa	20 °C
Pentano	40 °C

Finalmente, deve-se determinar as variáveis de controle mencionadas na **Tabela 30**, a vazão mássica ($\dot{m}$) e variação de pressão na bomba (PR_p). Na **Tabela 32** são mostados os limites inferiores e superiores utilizados para a simulaçãodo sistema ORC.

Tabela 32 - Limites inferiores e superiores das variáveis de controle da simulação.

Fluido	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	3 a 40	6 a 15
R123	40 a 75	6 a 15
R245fa	40 a 75	6 a 15
Pentano	3 a 40	6 a 14

Portanto, ao fazer uso das condições de entrada previamente apresentadas foi possível determinar a eficiência exergética interna para os diferentes fluidos.

A **Tabela 33** apresenta os resultados obtidos para o Ciclopentano como fluido de trabalho. A eficiência exergética atingiu um máximo de 28,8%, atingido ao incrementar tanto a vazão do fluido de trabalho como a razão de pressão na bomba. Como esperado a eficiência exergética é incrementada com o aumento do PR, entretanto nesse caso, a maior PR foi atingida apenas por um valor de vazão mássica.

Tabela 33 – Resultados da Eficiência Exergética interna [%] utilizando o Ciclopentano como fluido de trabalho.

		Razão de Pressão na Bomba						
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Vazão (kg/s)	**18**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	19	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	20	18,7	20,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	21	18,9	20,9	22,6	24,1	0,0	0,0	0,0
	22	19,1	21,1	22,8	24,4	25,9	27,2	0,0
	23	19,3	21,3	23,1	24,7	26,2	27,5	**28,8**
	24	19,4	21,4	23,3	24,9	26,4	0,0	0,0
	25	19,5	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A Tabela 34 apresenta os resultados para o pentano, indicando que a máxima eficiência exergética interna é obtida na maior razão de pressão, onde apenas uma vazão foi possível. Para vazões menores, o aumento da vazão mássica tendeu a aumentar a eficiência exergética interna.

Tabela 34 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o pentano como fluido de trabalho.

		Razão de Pressão na Bomba						
		8	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Vazão [kg/s]	**21**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	22	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	23	21,3	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	24	21,5	23,0	24,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	25	21,7	23,3	24,7	26,0	0,0	0,0	0,0
	26	21,9	23,5	25,0	26,3	**27,6**	0,0	0,0
	27	22,1	23,7	25,2	26,6	0,0	0,0	0,0
	28	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	31	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Quando o refrigerante R123 foi utilizado como fluido de trabalho, os valores máximos da eficiência exergética atingiram 25,3%, conforme observado na Tabela 35, com uma razão de pressão de 10 e vazão de 55 kg/s. É importante observar que a vazão mássica é inversamente proporcional à eficiência exergética interna, sendo o ponto ótimo localizado no máximo PR.

Tabela 35 - Resultados da Eficiência Exergética interna [%] utilizando o R123 como fluido de trabalho.

		Razão de Pressão na Bomba									
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Vazão [kg/s]	**49**	18,2	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	18,2	20,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	51	18,2	20,2	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	52	18,3	20,3	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	53	18,3	20,3	22,1	23,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	54	18,3	20,3	22,1	23,8	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	55	18,3	20,3	22,1	23,8	**25,3**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	56	18,3	20,3	22,2	23,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	57	18,3	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

No caso de fluido R245fa (Tabela 36), a máxima eficiência exergética atingiu 26,6%.

Tabela 36 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o r245fa como fluido de trabalho.

		Razão de Pressão na Bomba						
		9	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Vazão [kg/s]	**45**	21,4	22,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	46	21,4	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	47	21,5	22,8	24,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	48	21,5	22,9	24,1	25,3	0,0	0,0	0,0
	49	21,5	22,9	24,2	25,4	0,0	0,0	0,0
	50	21,5	22,9	24,2	25,4	26,5	0,0	0,0
	51	21,5	22,9	24,2	25,4	**26,6**	0,0	0,0
	52	21,5	22,9	24,2	25,4	0,0	0,0	0,0
	53	21,5	22,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Finalmente, a Tabela 37 apresenta um resumo, com os melhores resultados obtidos para cada um dos fluidos analisados.

Tabela 37 – Resumo dos resultados para os pontos ótimos obtidos

Fluido	Efic. Exergética (%)	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	28,8	23	12
Pentano	27,6	26	12
R123	25,4	51	15
R245fa	22,6	49	12

A destruição exergética obtida para os pontos ótimos da Tabela 37 é detalhada na Tabela 38. Onde, de acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto o R245fa resultou na maior destruição exergética.

Tabela 38 – Destruição Exergética [kW] nos pontos ótimos obtidos

	Evaporador	Condensador	Regenerador	Turbina	Total
Ciclopentano	2015,5	999,6	233,4	286,4	**3538,4**
R123	3012,5	338,4	198,8	288,6	**3842,3**
Pentano	2526,9	659,5	139,0	301,5	**3631,2**
R245fa	3426,1	187,6	84,4	332,7	**4035,7**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados, mostradas na

Tabela **39**. Os resultados indicam que o ciclo pentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R245fa apresentou os piores resultados para as condições simuladas.

Tabela 39 – Resultados de potência e eficiência termodinâmica

Fluidos	Potência Líquida [kW]	Eficiência [%]
Ciclopentano	2.271,9	17,0
R123	1.995,9	14,9
Pentano	2.176.2	16,3
R245fa	2095,2	15,7

Os resultados termodinâmicos detalhados, considerando cada estado termodinâmico, são apresentados no Apêndice III.

4.2.4 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

Para a análise da viabilidade econômica do estudo de caso, considerou-se a utilização de unidades de mercado, que operam com níveis de eficiência superior àqueles calculados na análise exergética da seção 4.2.1. Esse ganho de eficiência ocorre, pois, as unidades

comerciais possuem otimizações de projeto realizadas por seus fabricantes, além de permitir a adoção de fluidos de trabalho diferentes daqueles simulados na etapa anterior.

Assim, considerando as informações da energia térmica disponível, foi possível verificar o catálogo de um dos fabricantes (Tabela 40) para selecionar a máquina mais adequada ao projeto.

Ademais, de forma a manter uma visão mais conservadora do empreendimento, apesar das informações de projeto do fabricante indicarem eficiências de projeto entre 22,7% e 23,8% na conversão, optou-se por utilizar um valor de 22%, visando contemplar a perdas de eficiência ao longo da vida útil do equipamento e os efeitos de maiores temperaturas de condensação em países mais quentes (GANAPATHY, 2003).

Tabela 40 - Catálogo das máquinas estudadas para produção de eletricidade

Parâmetros	**Unidades**	**1 MW**		**12 HRS**		**24 HRS**		**32 HRS**	
Entrada de Calor - Óleo Térmico		Com Split	Sem Split	Com Split	Sem Split	Com Split	Sem Split	Com Split	Sem Split
Temperatura nominal "Alta Temperatura" (entrada/saída)	°C	305/209	305/204	305/210	305/206	310/215	310/212	310/215	310/214
Potência térmica demandada "Alta Temperatura"	kW	3817	4043	4425	4817	8850	9634	12015	13075
Temperatura nominal "Baixa Temperatura" (entrada/saída)	°C	209/130	-	210/130	-	215/135	-	215/135	-
Potência térmica demandada "Baixa Temperatura"	kW	338	-	392	-	784	-	1060	-
Input térmico Total	kW	4155	4043	4817	4817	9634	9634	13075	13075
Rejeito de Calor - Água de Resfriamento									
Temperatura da água (entrada/saída)	°C	25/35	25/35	25/35	25/35	24/37	24/37	25/40	25/40
Rejeito de Calor	kW	3151	3040	3662	3662	7256	7310	9977	9897
Desempenho									
Potência elétrica bruta	kW	1000	1000	1156	1188	2270	2336	3109	3193
Eficiência elétrica bruta	%	24,1%	24,7%	24,0%	24,7%	23,6%	24,2%	22,9%	23,5%
Consumo interno de potência	kW	36	36	46	49	87	92	119	125
Potência elétrica líquida	kW	964	964	1110	1139	2183	2244	2990	3067
Eficiência elétrica líquida	%	23,2	23,8	23,0%	23,6%	22,7%	23,3%	22,9%	23,5%

Fonte: (TURBODEN, 2013).

Como mencionado nas premissas gerais, também foi considerada uma perda de 15% da energia disponível na fonte quente até o ORC, levando em conta as perdas de calor pela transferência e transporte de calor para o fluido térmico intermediário e dele para o sistema ORC. Assim, a Tabela 41 mostra os resultados obtidos para o sistema e que serão considerados na avaliação financeira.

Tabela 41 - Resultado da potência elétrica estimada para modulo ORC.

Fonte Quente	
Disponibilidade de Calor (MW)	13,3
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	11,31
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	2,49

Considerando uma máquina 24HRS como sendo aquela que apresentou as características operativas mais próximas dos valores da Tabela 41, os custos de instalação mostrados na Tabela 42 foram estimados com o fornecedor da tecnologia para o caso de estudo em questão.

Tabela 42 – Custos de Investimento em US$ (Química)

Capex	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Sistema Principal			
Modulo ORC	2.747	3.760	3.253
Equipamentos Auxiliares	724	954	839
Trocador de Calor	1.766	2.263	2.015
Estrutura			
Engenharia Básica	249	721	485
Projeto Executivo e Outros	622	1.244	933

Instalação			
Conexão à Rede	124	249	187
Instalação	448	995	721
Total	**6.680**	**10.185**	**8.432**

O modelo financeiro foi executado para as três diferentes hipóteses de custos: pessimista, médio e otimista, sendo os cálculos financeiros realizados de ano a ano.

Na Tabela 43 são detalhados os custos de O&M e os valores considerados para a disponibilidade do sistema, variando entre 85% e 90% que resultam no custo de operação anual da unidade do sistema.

Tabela 43 - Custos de Operação e Manutenção do Sistema.

Custos de Operação	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (horas/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção (US$/kWh)	7,0	12,0	9,5
Manutenção Anual (US$/ano)	137.258	222.227	179.743
Total (US$/ano)	**137.258,07**	**222.227,36**	**179.742,72**

Os resultados detalhados dos estudos de caso se encontram no Apêndice I.

A Tabela 44 mostra os resultados do fluxo de caixa para o caso Médio em seus 10 primeiros anos.

Tabela 44 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio. (Química)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
Potência para o Grid (MW)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**
Despesas		(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
PP&E Bruto	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683	9.275.683
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**	**9.275.683**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(9.275.683)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(9.275.683)**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
FC Acumulado	(9.275.683)	(7.717.102)	(6.158.520)	(4.599.939)	(3.041.358)	(1.482.776)	75.805	1.634.387	3.192.968	4.751.550	6.310.131

A Tabela 45 compila as principais informações do estudo de caso para a indústria química, comparando os resultados para os três conjuntos de premissas considerados no modelo. Os resultados do fluxo de caixa acumulado são apresentados na Figura 65.

Tabela 45 - Resumo dos resultados financeiros do Estudo de Caso (Química)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria		Química		
Fonte Quente				
Capacidade da Unidade		75.000 t/ano		
Potência Instalada ORC	MW	2,49	2,49	2,49
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	13,30	13,30	13,30
Potência Térmica para ORC	MW	11,305	11,305	11,31
Geração de Energia	MWh/ano	19608	18519	19064
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	5,24	6,98	6,11
Outros Custos	Milhão de US$	1,44	3,21	2,33
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	7,35	11,20	9,28
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		20,83%	12,62%	15,93%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		2.133.144	-1.259.282	417.387
Payback (Anos)		5	8	6
Custo Específico do Projeto	US$/kW	2954,25	4504,79	3729,52
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	30,07	39,96	33,76

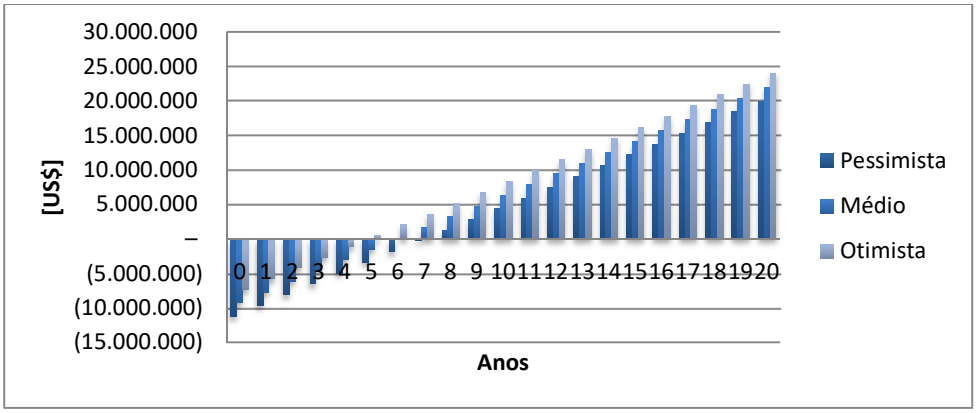


Figura 65 - Fluxo de Caixa Acumulado (US$) durante 20 anos

4.3 – Estudo de Caso: Cimento

Localizada na região de Cantagalo, interior do estado do Rio de Janeiro, a fábrica analisada conta com uma capacidade instalada de 2.200 toneladas por dia (cerca de 800 mil toneladas ao ano), produzindo cimento através da rota de via seca (Figura 66).

Figura 66 - Vista aérea da fábrica de cimento estudada.

Após a visita da fábrica e apresentação do funcionamento da recuperação de calor via ORC, foram definidos dois pontos passíveis de recuperação de calor, detalhados a seguir.

4.3.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

Durante a visita ao local, foram analisados dois pontos típicos de recuperação de calor na indústria de cimento, são eles:

- A exaustão dos gases do forno (*kiln*), após a passagem pelos ciclones
- Gases de resfriamento do clínquer.

A Figura 67 mostra um fluxograma com as temperaturas de projeto informadas pela equipe da fábrica.

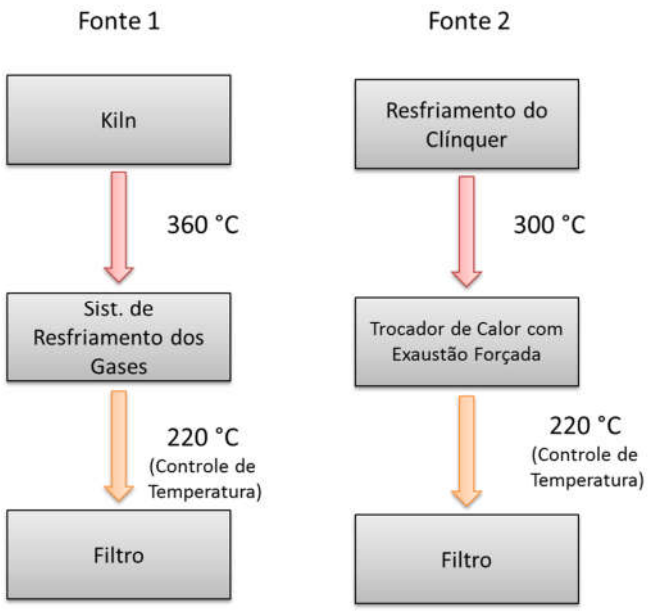


Figura 67 - Fluxograma das fontes de calor analisadas.

A vazão dos gases de exaustão do forno (kiln) informada é de 220.000 Nm³/h, enquanto no resfriamento de clínquer é equivalente a 100.000 Nm³/h. Dessa forma, ao assumir a composição química exibida na Tabela 46, obtida no estudo de ARACHCHIGE, *et al.* (2014) e uma pressão próxima à atmosférica para os gases na saída do forno e do sistema de resfriamento de clínquer, é possível definir o estado termodinâmico do ponto fazendo uso do REFPROP, conforme mostrado na Tabela 47.

Tabela 46 - Composição química da exaustão considerada.

Elemento	%
CO_2	30,4
N_2	62,2
O_2	3,75
H_2O	3,65

Fonte: (ARACHCHIGE, KAWAN, *ET AL.*, 2014)

Tabela 47 - Dados de Projeto das condições termodinâmicas da fonte quente

	Forno	Resf. Clínquer	Unidade
Pressão	101,33	101,33	kPa
Temperatura	360	300	C
Entalpia	782,18	716,60	kJ/kg
Entropia	6,15	6,04	kJ/kg-C
Densidade	0,629	0,816	kg/m³

Considerando que as fontes quentes terão suas temperaturas reduzidas conforme o diagrama apresentado na Figura 67, pois a temperatura de 220ºC é um pré-requisito operacional para o sistema de filtragem, resultando no estado termodinâmico exibido na Tabela 48, e, como os gases de ambas as fontes são resfriados até a mesma temperatura (220 °C), o estado termodinâmico de ambos é equivalente.

Tabela 48 - Condições termodinâmicas da exaustão após a troca de calor.

	Forno (kiln)	Resf. Clínquer	Unidade
Pressão	101,33	101,33	kPa
Temperatura	220	220	C
Entalpia	631,23	631,23	kJ/kg
Entropia	5,88	5,88	kJ/kg-C
Densidade	0,807	0,807	kg/m³

Finalmente, o calor disponível na exaustão do forno (após a passagem pelos ciclones) e nos gases de resfriamento no clínquer pode ser calculado através da variação de entalpia e das vazões de cada ponto, resultando em 13,5 MW térmicos no forno e 3,4 MW térmicos provenientes dos gases de resfriamento do clínquer, atingindo 16,9 MW térmicos de energia disponível para o sistema ORC.

4.3.2 – Sistema Proposto

O sistema para a recuperação de calor proposto para o caso analisado segue o padrão tipicamente recomendado para esse tipo de aplicação na indústria de cimento, conforme observado por FORNI, *et al.* (2012). A Figura 68 mostra os pontos de recuperação de calor que fornecem energia térmica para a produção de eletricidade no módulo ORC.

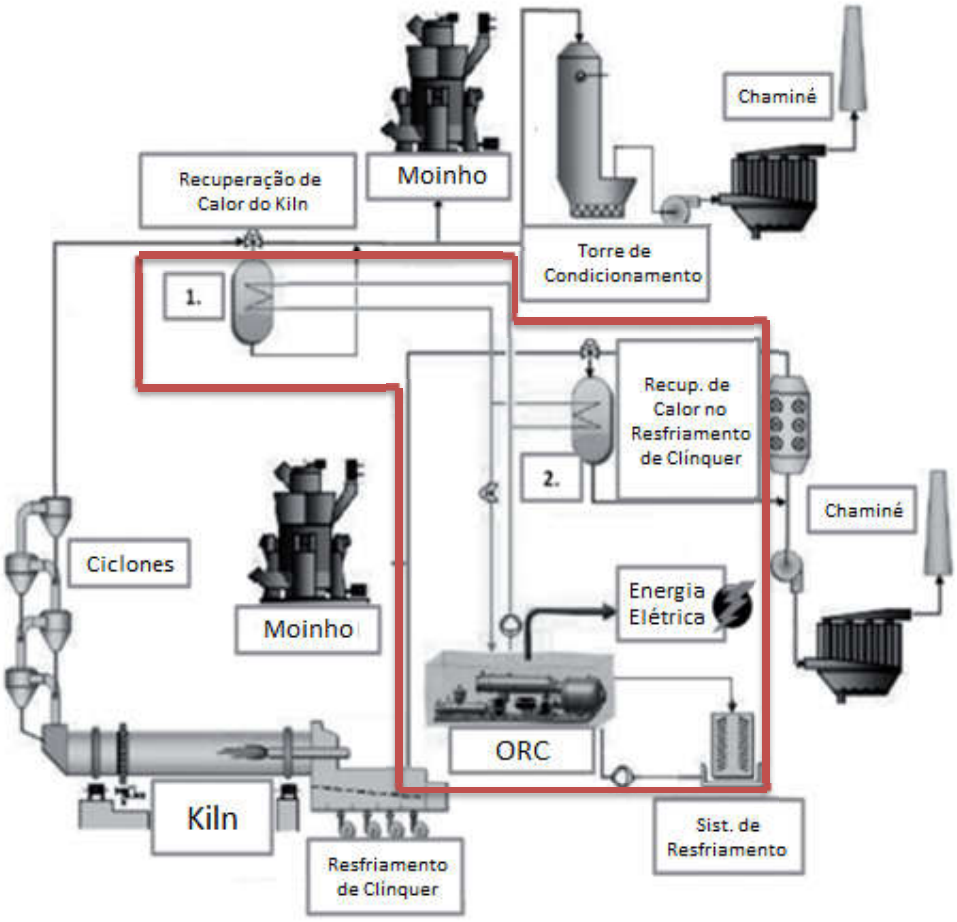


Figura 68 - Sistema proposto para recuperação de calor no Estudo de Caso do setor de Cimento.

4.3.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC

A análise exergética para o estudo de caso de cimento foi realizada de maneira similar àquela apresentada para o estudo de caso do setor químico, entretanto como já foi identificado previamente um maior desempenho para os ORCs utilizando ciclopentano como fluido de trabalho, optou-se por apresentar apenas esse fluido na presente seção. Ademais, os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo e o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice III, juntamente com os resultados dos demais fluidos de trabalho.

A Tabela 49 mostra os resultados da eficiência exergética do ORC em função da vazão e razão de pressão na bomba, sendo o valor máximo obtido de 21,3%.

Tabela 49 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o ciclopentano como fluido de trabalho - cimento.

		Razão de Pressão na Bomba [%]								
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Vazão [kg/s]	**22**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	24	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	25	13,8	15,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	26	14,0	15,4	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	27	14,1	15,5	16,8	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	14,2	15,7	17,0	18,1	19,2	20,2	0,0	0,0	0,0
	29	14,3	15,8	17,1	18,3	19,4	20,4	**21,3**	0,0	0,0
	30	14,4	15,9	17,2	18,4	19,6	20,6	0,0	0,0	0,0
	31	14,4	16,0	17,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	32	14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	33	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A Tabela 50 apresenta os pontos ótimos resultantes, enquanto a destruição exergética obtida é mostrada na Tabela 51.

Tabela 50 – Resumo dos resultados para os pontos ótimos obtidos

Fluido	Efic. Exergética (%)	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	21,3	29	12
Pentano	20,6	34	12
R123	18,8	70	10
R245fa	19,7	39	13

De acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto o R245fa resultou na maior destruição exergética.

Tabela 51 – Destruição Exergética [kW] nos pontos ótimos obtidos

	Evaporador	Condensador	Regenerador	Turbina	Total
Ciclopentano	1510,8	1189,6	302,6	361,3	**3368,7**
R123	2784,6	345,9	241,0	366,8	**3742,9**
Pentano	2192,1	748,7	112,7	391,6	**3451,3**
R245fa	3307,5	152,3	95,4	423,2	**3984,5**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados, conforme Tabela 52. Os resultados indicam que o ciclopentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R245fa apresentou os piores resultados para as condições simuladas.

Tabela 52 – Resultados de potência e eficiência termodinâmica

Fluidos	Potência Líquida [kW]	Eficiência [%]
Ciclopentano	2871,9	17,0
R123	2526,9	15,0
Pentano	2774,0	16,4
R245fa	2652,5	15,7

4.3.4 Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

De forma semelhate ao estudo de caso de Química, para o estudo de viabilidade foram consideradas informações dos fabricantes e não os resultados da análise exergética devido aos ganhos de rendimento e otimizações dos ORCs comerciais. Logo, foi considerada uma perda de 15% da energia disponível até sua entrega ao sistema ORC. Esse parâmetro depende diretamente do fluido utilizado como vetor para transporte da energia (fluidos térmicos, vapor, etc.) e do projeto do trocador de calor do sistema intermediário, onde trocadores de calor maiores (e também mais custosos) podem otimizar a eficiência de troca, através do aumento da efetividade da troca de calor.

Através da quantidade de energia térmica disponível, consultou-se o catálogo da Tabela 40, para selecionar a máquina mais adequada ao projeto e determinar a eficiência de conversão do ciclo, apresentada na Tabela 53.

Como mencionado o estudo de caso anterior, novamente optou-se por utilizar o valor de 22% de eficiência, de forma a considerar as perdas de eficiência ao longo da vida útil do equipamento e os efeitos de temperaturas de condensação mais elevadas em países mais quentes, como o Brasil.

Tabela 53 – Resultado da Potência elétrica estimada para modulo ORC.

Considerações Técnicas	
Fonte Quente	
Disponibilidade de Calor (MW)	16,9
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	14,37
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	3,16

A Tabela 54 mostra os custos de instalação considerados para o caso de estudo em questão.

Tabela 54 – Custos de Investimento (Cimento)

Investimento (milhares de USD)	Otimista	Pessimista	Médio
Sistema Principal			
Modulo ORC	4.058	4.593	4.326
Equipamentos Auxiliares	1.283	1.448	1.365
Trocador de Calor	2.566	3.290	2.928
Estrutura			
Engenharia Básica	316	474	395
Projeto Executivo e Outros	632	948	790
Instalação			
Conexão à Rede	158	316	237
Instalação	632	1.264	948
Total	**9.646**	**12.333**	**10.989**
Custo Específico (US$/kW)	**3.052**	**3.902**	**3.477**

A Tabela 55 mostra os valores considerados para a disponibilidade do sistema, variando entre 85% e 90% e os custos de manutenção e operação anual da unidade de geração de eletricidade.

Tabela 55 - Custos de Operação e Manutenção do Sistema.

Custos de Operação	Otimista	Pessimista	Médio
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (horas/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção Anual (US$/ano)	174.411	282.379	228.395
Manutenção (US$/kWh)	7,0	12,0	9,5
Total (US$/ano)	**174.411**	**282.379**	**228.395**

O modelo financeiro foi executado para as três diferentes hipóteses de custos: pessimista, médio e otimista, sendo os cálculos financeiros realizados de ano a ano.

Na Tabela 56 são apresentados os resultados do caso de estudo utilizado as premissas médias.

Tabela 56 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio. (Cimento)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Potência Térmica da F. Quente (MWth)		16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848	2.208.848
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**	**2.208.848**
Despesas		(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)	(228.395)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**
PP&E Bruto	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220	12.088.220
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**	**12.088.220**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453	1.980.453
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(12.088.220)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(12.088.220)**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**	**1.980.453**
FC Acumulado	(12.088.220)	(10.107.767)	(8.127.314)	(6.146.861)	(4.166.408)	(2.185.955)	(205.502)	1.774.952	3.755.405	5.735.858	7.716.311

A Tabela 57 compila as principais informações do estudo de caso para a indústria de cimento, comparando os resultados para os três conjuntos de premissas considerados no modelo. Os resultados do fluxo de caixa acumulado são apresentados na Figura 69.

Tabela 57 - Resumo dos resultados financeiros do Estudo de Caso (Cimento)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria		Cimento		
Fonte Quente		Kiln e Resfriamento do Clínquer		
Capacidade da Unidade		2200 t/dia		
Potência Instalada ORC	MW	3,16	3,16	3,16
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	16,90	16,90	16,90
Potência Térmica para ORC	MW	14,37	14,37	14,37
Geração de Energia	MWh/ano	24916	23532	24224
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	6,08	7,09	6,59
Outros Custos	Milhão de US$	1,74	3,00	2,37
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	8,60	11,11	9,85
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		24,1%	15,9%	19,5%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		3.938.642	484.429	2.211.536
Payback (Anos)		5	6	5
Custo Específico do Projeto	US$/kW	2721,20	3514,31	3117,76
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	24,26	35,60	29,77

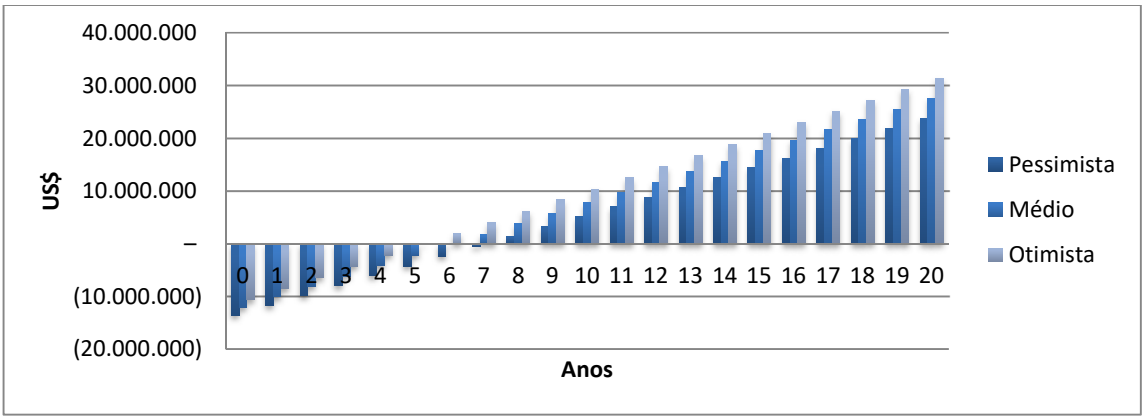


Figura 69 - Fluxo de Caixa Acumulado (US$) durante 20 anos

4.4 – Estudo de Caso: Ferro Gusa e Aço

A análise de recuperação de calor residual para produção de eletricidade via ORC foi realizada em uma usina semi-integrada com capacidade de produção de 1,020 milhão de toneladas de aço ao ano através de EAFs, localizada na região de Resende – RJ. O processo de laminação é realizado a quente, contando com fornos de reaquecimento de tarugo para o processo.

Após a visita da fábrica e apresentação do funcionamento de sistemas ORC à equipe técnica da siderúrgica, foram definidos dois pontos passíveis de recuperação de calor, detalhados a seguir.

4.4.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

4.4.1.1 - Forno de Reaquecimento de Tarugo

Informações sobre as condições termodinâmicas da exaustão do forno, após o sistema de aquecimento do ar para combustão, foram informadas pela equipe de engenharia da unidade.

A Tabela 58 mostra a composição química dos gases de exaustão provenientes da queima de gás natural, enquanto a Tabela 59 mostra as condições termodinâmicas da exaustão do forno de reaquecimento de tarugo.

Tabela 58 - Composição química considerada na exaustão do forno de reaquecimento de tarugo.

Elemento	%
CO_2	9,0
Ar	0,8
H_2O	13,0
N_2	72,8
O_2	4,4

Fonte: (BEERKENS, 1986)

Tabela 59 - Dados de Projeto das condições termodinâmicas da fonte quente (Reaquecimento de Tarugo).

Pressão	101,33	kPa
Temperatura	260,00	ºC
Entalpia	774,71	kJ/kg
Entropia	7,11	kJ/kg- ºC
Densidade	0,649	kg/m³

Os valores de entalpia, entropia e densidade foram calculados a fazendo uso do REFPROP. Ademais, a vazão dos gases informada pelos dados de projeto da fábrica é equivalente a 44.600 Nm³/hora, que resulta em aproximadamente 16,8 kg/s.

Para a determinação da quantidade de calor passível de recuperação da fonte quente, foi considerado que os gases de exaustão seriam resfriados até a temperatura de 130°C. Portanto, se a queda de pressão no trocador de calor for considerada nula, o estado termodinâmico dos gases quentes após ceder calor para recuperação será aquele mostrado na Tabela 60.

Tabela 60 - condições termodinâmicas da exaustão após a troca de calor.

Pressão	101,33	kPa
Temperatura	130,00	º C
Entalpia	630,81	kJ/kg
Entropia	6,81	kJ/kg- ºC
Densidade	0,859	kg/m³

Dessa forma, com a variação de entalpia entre os estados (antes de depois da troca) e com a vazão mássica dos gases na exaustão foi possível calcular a quantidade de calor disponível na descarga do forno, cerca de 2,39 MW térmicos. A disponibilidade de calor do forno de reaquecimento de tarugo analisada foi menor do que algumas referências internacionais (FORNI, *et al.*, 2014) devido ao o forno da fábrica em questão já possuir um sistema de preaquecimento do ar de combustão, reduzindo assim a disponibilidade de energia na exaustão.

4.4.1.2 Forno Elétrico a Arco

A recuperação do calor na exaustão dos gases do forno de arco elétrico normalmente apresenta maiores potenciais, devido às altas temperaturas e vazões. Porém, a intermitência do forno torna a operação do sistema um pouco mais complexa e a necessidade de materiais mais nobres para os trocadores de calor suportarem elevadas temperaturas são os principais contras desse potencial. A Figura 70 mostra um esquema do sistema de recuperação de calor de fornos de arco elétrico e os resultados tipicamente obtidos (TURBODEN, 2013).

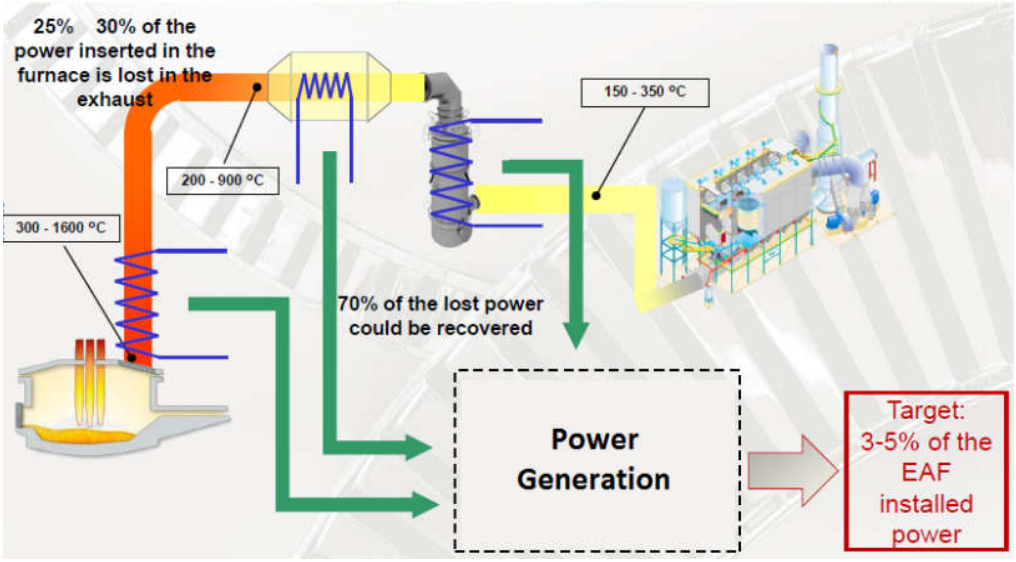


Figura 70 - Recuperação de calor em um forno de arco elétrico.

Fonte: (TURBODEN, 2013).

Na Figura 71 é mostrado o processo EAF da siderúrgica analisada, nela se verifica que os gases de exaustão do EAF são direcionados para uma câmara de remoção de partículas e sedimentos, sendo posteriormente direcionadas para a quenching tower, onde os gases de exaustão são resfriados.

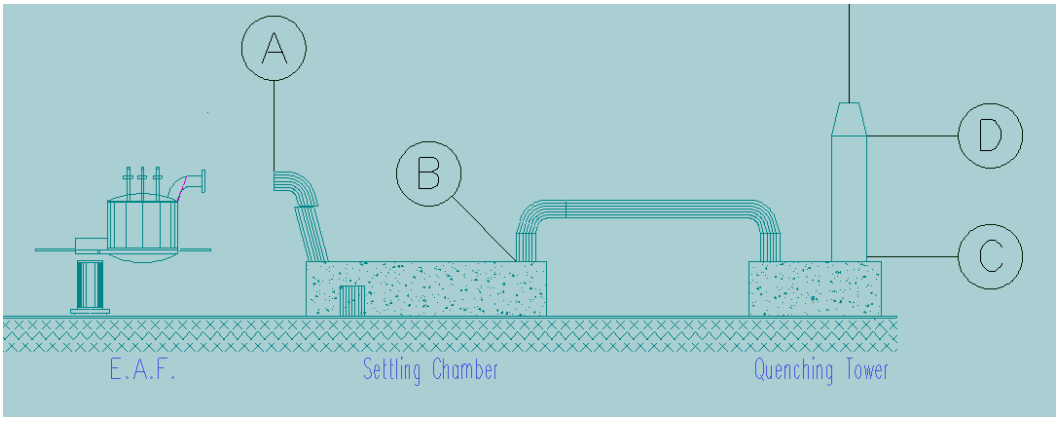


Figura 71 - Fluxograma do Sistema EAF Analisado[13].

Fonte: (VOTORANTIM, 2014)

Na Tabela 61 são apresentados os pontos de medição “A”, “B”, “C” e “D”, exibidos na Figura 71. A partir dessas informações, observa-se que antes da quenching tower a temperatura é de 720 °C, com uma vazão de 200.000 Nm³/h.

Tabela 61 – Informações operacionais de projeto do EAF Analisado.

description	point	height	width	duct dia.	Qn	T	Qe	v
		mm	mm	mm	Nm3/h	°C	Em3/h	m/s
Primary – Mobile duct inlet	A			2.900	200.000	1.200	1.083.000	46
Primary – S/CH inlet	B	5.500	6.500		200.000	1.000	940.000	7
QT inlet	C			4.600	200.000	720	746.000	12
QT outlet	D			2.600	260.000	250	511.000	27
Total	L			5.000	480.000	65	595.000	8
LF duct	E			1.200	55.000	130	82.000	20
MHS	F			1.200	70.000	40	81.000	20
Leadle deslagghing	G			1.000	50.000	50	60.000	21
Tundish deslagghing	H			1.000	50.000	50	60.000	21
Silo dicharging	I			1.000	50.000	50	60.000	21
Mixing point	M			5.000	1.015.000	105	1.452.000	21
Bag filter		6.500	5.000		1 015.000	105	1.456.000	12
	N	area t.	15400 m2					1.58
CAMINO	P			6.000	1.015.000	105	1.406.000	14

FONTE: (VOTORANTIM, 2014)

[13] A) Saída do Fornos Elétrico a Arco
B) Saída da câmara de assentamento para remoção do material particulado
C) Saída da *Quenching Tower*
D) Exaustão na chaminé

Assim, para a determinação do estado termodinâmico da fonte quente, assumiu-se que o fluido estaria a uma pressão aproximadamente equivalente à atmosférica. A composição química dos gases de exaustão do EAF varia significativamente, conforme apresentado no estudo de THEKDI, *et al.* (2015), onde as condições médias foram calculadas e utilizadas na presente análise.

Para calcular a quantidade de calor teórica passível de recuperação da fonte quente, foi considerado que os gases quentes poderiam ser resfriados até a temperatura de 250°C, valor do ponto "D" da Tabela 61. Logo, se a queda de pressão no trocador de calor for considerada nula, o estado termodinâmico dos gases quentes após ceder calor para recuperação será aquele mostrado na Tabela 62.

Tabela 62 – Dados da exaustão após a troca de calor.

Pressão	101,33	kPa
Temperatura	250,00	º C
Entalpia	533,46	kJ/kg
Entropia	7,41	kJ/kg- ºC
Densidade	0,67	kg/m³

Assim, definidos os estados termodinâmicos da fonte quente, foi possível determinar o calor tórico disponível através da variação de entalpia e da vazão mássica, resultando em aproximadamente 37 MW térmicos. Entretanto, deve-se ressaltar que o EAF possui um efeito de cycling operativo muito intenso, não mantendo a temperatura da fonte quente contínua devido ao *Tap to Tap*[14] de 60 minutos da operação, ficando a uma temperatura muitas vezes abaixo da temperatura apresentada na Tabela 62.

Logo para estimar o calor realmente passível de recuperação, fez-se uso das informações do fabricante Turboden e apresentadas FORNI, *et al.*, (2014), responsável por fornecer a unidade geradora para um projeto de recuperação de calor utilizando ORC, para o Grupo Feralpi, em Riesa, na Alemanha em um forno elétrico de capacidade de 1 milhão de toneladas ao ano. Segundo o fabricante, a energia média disponível para a

[14] Tempo para a finalização do ciclo operativo de uma carga no EAF.

produção de eletricidade no caso da siderúrgica brasileira analisada seria da ordem de 16,1 MW térmicos (TURBODEN, 2014).

4.4.2 – Sistema Proposto

O sistema é composto por um trocador de calor que retira energia térmica dos gases de exaustão e transfere calor para um fluido térmico, que é aquecido e alimenta o módulo ORC, funcionando como a fonte quente. Como toda máquina térmica, o módulo ORC deve rejeitar calor para uma fonte fria, logo um circuito de água à temperatura ambiente também deve alimentar o módulo. A Figura 72 mostra o sistema proposta para recuperação de calor do *EAF*. O calor proveniente dos fornos de reaquecimento de tarugo seria coletado pelo mesmo circuito intermediário (em rosa).

Tem-se um total de aproximadamente 18,5 MW térmicos de potência, sendo o EAF responsável por cerca de 90% dessa energia. Entretanto, parte dessa energia é perdida no trocador de calor e no transporte da energia até o sistema ORC através do circuito do fluido intermediário (heat carrier).

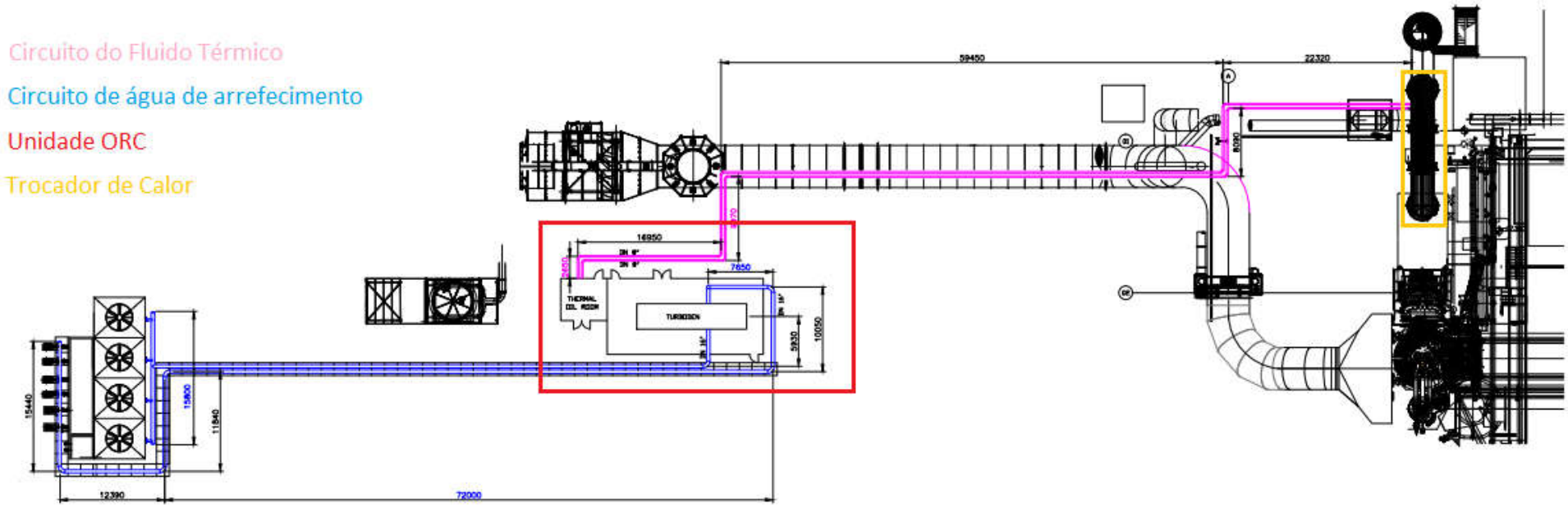


Figura 72 - Fluxograma da recuperação de calor no EAF.

Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de (VOTORANTIM, 2014)

4.4.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC

A análise exergética para o estudo de caso na siderurgia também foi realizada de maneira similar àquela apresentada para o estudo de caso do setor químico, optou-se por apresentar nessa seção apenas os resultados do ciclopentano. Ademais, os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice II, bem como os resultados para os demais fluidos.

A Tabela 63 mostra os resultados da eficiência exergética do ORC em função da vazão e razão de pressão na bomba, sendo o valor máximo obtido de 34,7%.

Tabela 63 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o ciclopentano como fluido de trabalho – siderurgia.

		Razão de Pressão na Bomba								
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Vazão [kg/s]	**26**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	27	22,4	24,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	22,5	24,9	26,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	29	22,7	25,1	27,1	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30	22,9	25,3	27,4	29,2	31,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	31	23,0	25,4	27,6	29,5	31,2	32,9	0,0	0,0	0,0
	32	23,1	25,6	27,7	29,7	31,5	33,1	**34,7**	0,0	0,0
	33	23,3	25,7	27,9	29,9	31,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	34	23,3	25,8	28,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	35	23,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	36	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Na Tabela 64 são apresentados os melhores resultados obtidos para cada um dos fluidos analisados.

Tabela 64 – Resumo dos resultados para os pontos ótimos obtidos

Fluido	Efic. Exergética (%)	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	34,7	32	12
Pentano	33,4	37	12
R123	30,4	76	10
R245fa	31,9	71	13

A destruição exergética obtida para os pontos ótimos é mostrada na Tabela 65. Onde, de acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto o R245fa resultou na maior destruição exergética.

Tabela 65 – Destruição Exergética [kW] nos pontos ótimos obtidos

	Evaporador	Condensador	Regenerador	Turbina	Total
Ciclopentano	344,7	1253,8	296,5	397,9	**2297,8**
R123	1708,9	339,9	265,9	398,4	**2718,3**
Pentano	1067,5	779,4	121,8	426,1	**2401,5**
R245fa	2285,1	127,5	96,5	461,6	**2977,5**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados. Os resultados mostram que o ciclopentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R123 resultou na pior eficiência termodinâmica e potência líquida.

Tabela 66 – Resultados de potência e eficiência termodinâmica

Fluidos	Potência Líquida [kW]	Eficiência [%]
Ciclopentano	3136,3	17,1
R123	2748,2	15,0
Pentano	3017,9	16,4
R245fa	2886,2	15,7

4.4.4 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

A partir da modelagem termodinâmica inicial trabalhada no item anterior, fez-se uso das informações de catalogo de fabricantes comerciais para a seleção de uma unidade geradora ORC e o desenvolvimento da modelagem econômica.

Para o caso em questão, considerou-se uma perda de 20% da energia disponível até sua entrega ao sistema ORC, resultando numa eficiência da troca de calor de 80%. Conforme mencionado nas premissas gerais desses capítulos, a eficiência de conversão da energia térmica disponível em calor útil para o ORC é inferior aos demais casos devido à grande variação das condições termodinâmicas da exaustão do *EAF*, fazendo com que o trocador de calor operar constantemente em condições off-design (TURBODEN, 2014).

Através da quantidade de energia térmica disponível, consultou-se o catálogo de máquinas ORC de um fabricante para selecionar aquela mais adequada ao projeto e determinar a eficiência de conversão do ciclo, apresentada na Tabela 67.

Porém, novamente optou-se por trabalhar com uma eficiência de conversão inferior, apesar da folha de dados do fabricante mostrar uma eficiência de 24,4%, foi assumido um valor de 22% para os estudos. Essa escolha se deu apenas devido a uma incerteza sobre o desempenho da máquina em países mais quentes, uma vez que o aumento da temperatura da fonte fria reduz a eficiência termodinâmica do ciclo.

Tabela 67 – Resultado da Potência elétrica estimada para modulo ORC.

Considerações Técnicas	
Fonte Quente	
Disponibilidade de Calor (MW)	18.5
Eficiência da Troca de Calor (%)	80%
Calor para o ORC (MW)	14,8
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	3,29

Com os dados inseridos no modelo, foi possível estimar um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 3,3 MW a partir de rejeitos térmicos da fábrica.

A Tabela 68 mostra os custos de instalação obtidos para o caso estudado.

Tabela 68 – Estimativa do CAPEx.

Investimento (milhares de US$)	Otimista	Pessimista	Médio
Sistema Principal			
Modulo ORC	4.070	4.535	4.302
Equipamentos Auxiliares	823	987	905
Trocador de Calor	2.303	2.961	2.632
Estrutura			
Engenharia Básica	329	494	411
Projeto Executivo e Outros	658	987	823
Instalação			
Conexão à Rede	165	329	247
Instalação	658	1.316	987
Total	**9.005**	**11.609**	**10.307**
Custo Específico (US$/kW)	**2.737**	**3.528**	**3.132**

Apesar disponibilidade de um sistema ORC normalmente ser de cerca de 95%, como a recuperação de calor se dará em um forno de arco elétrico que possui uma grande variação em seu regime de operação, o valor da disponibilidade do sistema foi reduzido. A Tabela 69 mostra os valores considerados

Tabela 69 - Estimativas do OPEx

Custos de Operação	Otimista	Pessimista	Médio
Disponibilidade (%)	85%	70%	78%
Horas de Operação (horas/ano)	7.446	6.132	6.789
Manutenção Anual (US$/ano)	171.498	242.115	206.806
Manutenção (US$/MWh)	7,0	12,0	9,5
Total (US$/ano)	**171.498**	**242.115**	**206.806**

O modelo financeiro foi executado para as três diferentes hipóteses de custos: pessimista, médio e otimista, sendo os cálculos financeiros realizados de ano a ano do fluxo de caixa para o caso Médio exibidos na a Tabela 70.

Tabela 70 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio (Siderurgia)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897	2.036.897
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**	**2.036.897**
Despesas		(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)	(206.806)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**
PP&E Bruto	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533	11.337.533
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**	**11.337.533**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090	1.830.090
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(11.337.533)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(11.337.533)**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**	**1.830.090**
FC Acumulado	(11.337.533)	(9.507.443)	(7.677.352)	(5.847.262)	(4.017.171)	(2.187.081)	(356.990)	1.473.100	3.303.191	5.133.281	6.963.372

A Tabela 71 é uma tabela-resumo dos resultados obtidos para os três casos analisados. Os fluxos de caixa dos mesmos são apresentados na Figura 73.

Tabela 71 – Resumo do Caso de Estudo (Siderurgia)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria		Siderurgia		
Fonte Quente		Forno Reaquecimento de Tarugo e EAF		
Capacidade da Unidade		1020 Mt/ano		
Potência Instalada ORC	MW	3,29	3,29	3,29
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	17,60	17,60	17,60
Potência Térmica para ORC	MW	14,96	14,96	14,96
Geração de Energia	MWh/ano	24499,71	20176,23	22337,97
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	7,20	8,48	7,84
Outros Custos	Milhão de US$	1,81	3,13	2,47
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	9,91	12,77	11,34
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		20,2%	11,1%	15,3%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		2.612.618	(2.408.080)	102.269
Payback (Anos)		5	8	7
Custo Específico do Projeto	US$/kW	3010,49	3880,96	3445,73
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	27,22	43,65	34,64

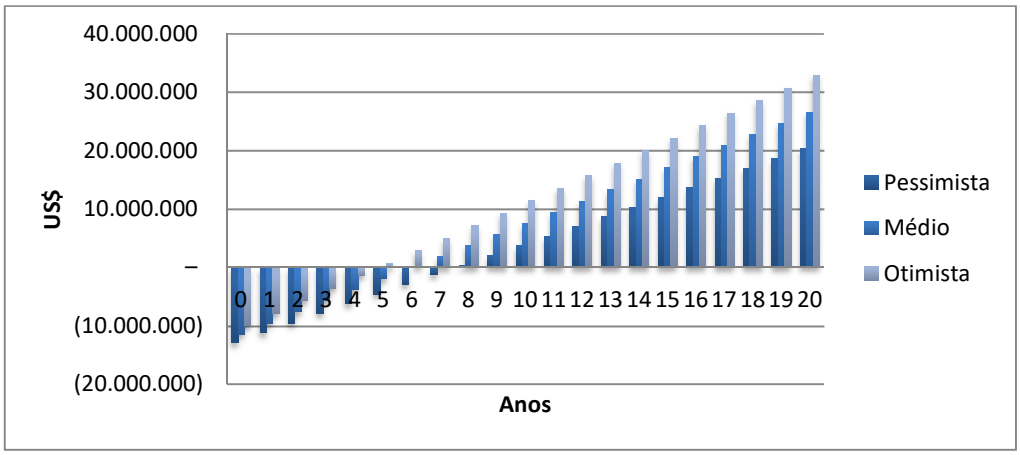


Figura 73 – Resultados para o Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Siderurgia).

4.5 – Estudo de Caso: Alumínio

O estudo de caso do setor de alumínio brasileiro foi realizado em uma unidade de reciclagem, localizada em Pindamonhangaba, São Paulo. A unidade possui capacidade de laminação de 600 mil toneladas de reciclado laminado ao ano, sendo o maior centro de reciclagem de alumínio do país.

Dessa forma, essa unidade não conta as etapas de produção de alumina e alumínio primário, possuindo uma intensidade energética de 5% da energia que seria demandada no processo completo de produção de alumínio primário (BREF, 2014).

Depois da preparação da matéria-prima, onde são removidas impurezas, a sucata passa por uma calcinadora (*kiln* de reciclagem), responsável por remover a tinta das embalagens recicladas. Posteriormente, a sucata é direcionada aos fornos para o derretimento do alumínio. Após o resfriamento do alumínio derretido na forma de tarugo, os mesmos são encaminhados para a etapa de laminação, para produção da chapa de alumínio, o produto final da empresa. Estima-se que o consumo específico de energia térmica nos fornos de reciclagem seja de aproximadamente 3,8 GJ/tonelada (BREF, 2014).

4.5.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

Após visitas ao local e troca de informações com a equipe de engenharia da empresa, responsável por fornecer os fluxogramas de processo de dados de projeto, verificou-se que os grandes rejeitos térmicos da fábrica estão situados nos locais mostrados na Figura 74.

Por uma questão de disponibilidade de espaço físico para localização das unidades, combinada com o fato de ser possível uma integração de ambas as fontes numa mesma unidade ORC, foram selecionados o *kiln* (forno rotativo) e dois fornos *sidewell* (SW) para recuperação de calor.

Figura 74 - Forno de Reciclagem (esquerda) e Forno Sidewell (direita).

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados necessários para o cálculo da disponibilidade de calor para produção de energia são mostrados na Tabela 72, onde foi considerada uma composição química dos gases equivalente àquela analisada por (LAZIC, *et al*., 2005), onde a razão ar-combustível foi considerada equivalente a 1 para uma queima de óleo combustível leve (Tabela 73).

Tabela 72 - Condições Termodinâmicas das Fontes de Calor selecionadas para análise.

Fonte Quente	Temperatura Média				Máxima Temperatura			
	Temp. Média [°C]	Vazão Média [m³/h]	Entalpia [kJ/kg-ºC]	Vazão Mássica [kg/s]	Temp. Máxima [°C]	Vazão Máxima [m³/h]	Entalpia [kJ/kg-ºC]	Vazão Mássica [kg/s]
Forno 2	698	40800	1285,3	15,28	922	40800	1572,38	15,28
SW 5	170	9939	663,35	1,74	282	20541	787,80	3,60
SW 6	170	9939	663,35	1,74	282	20541	787,80	3,60
Mistura	605,4	-	1169,87	18,77	726,56	-	1321,25	22,47

Verifica-se que a temperatura média no ponto passível de recuperação de calor dos fornos sidewell não é muito elevada, atingindo valores máximos de 282 °C, com média de 170°C. Ademais, a vazão de gases de exaustão nesse forno é consideravelmente mais

baixa do que aquela disponível no forno de reciclagem, fazendo com que o total de energia térmica passível de recuperação nessa fonte seja consideravelmente mais baixo do que o forno.

Tabela 73 - Composição química dos fornos considerada

Elemento	%
CO_2	11,97
CO	1,65
H_2O	11,32
N_2	74,03
H_2	0,3
O_2	0,73

Para a determinação do calor disponível, deve-se considerar uma temperatura mínima, na qual os gases de exaustão possam ser resfriados, para tal foi assumido um valor de 130°C, resultando no estado termodinâmico mostrado na Tabela 74.

Tabela 74 – Condições termodinâmicas dos gases de exaustão após a troca de calor

Pressão	101,33	kPa
Temperatura	130	ºC
Entalpia	409,89	kJ/kg
Entropia	7,14	kJ/kg- ºC
Densidade	0,87	kg/m³

Assim, foi possível calcular a potência térmica disponível em cada uma das fontes, mostrada na Tabela 75. Os resultados indicam que a energia térmica média disponível nos fornos SW é consideravelmente inferior àquela disponível no kiln, o que poderia indicar um baixo custo benefício para sua recuperação.

Entretanto, no sistema analisado, os gases de exaustão do forno e dos sidewell se encontram num mesmo duto de exaustão, não sendo, portanto, necessário considerar mais trocadores de calor para "coletar" essa energia disponível, mantendo assim a viabilidade de recuperar o calor de todas as fontes analisadas.

Tabela 75 – Potência térmica disponível calculada [kW]

Fonte	Média	Máxima
Forno 2	10173,9	14562,3
SW 5	76,3	607,2
SW 6	76,3	605,2
Total	10326,5	15774,7

Dessa forma, verifica-se uma potência média de cerca de 10,3 MW térmicos, podendo atingir até aproximadamente 15,7 MW.

4.5.2 – Sistema Proposto

O sistema proposto segue a configuração clássica, sendo composto por um trocador de calor para coleta da energia térmica dos gases de exaustão, transferindo-a para um fluido térmico, responsável por alimentar o módulo ORC. O sistema de arrefecimento, para condensação do ORC é composto por torres de arrefecimento e bombas de circulação de água. A configuração proposta para o sistema de recuperação de calor é mostrada na Figura 75.

Optou-se por dimensionar o sistema em função da temperatura média de operação, pois, segundo informações da unidade fabril, o tempo de operação em que o forno atinge a temperatura máxima é muito curto. Dessa forma, caso o sistema fosse dimensionado para o valor máximo a operação fora de ponto de projeto seria desvantajosa. Calculou-se um valor de 10,3 MW médios de potência térmica (com uma máxima de 15,7 MW), onde aproximadamente 16% da energia é proveniente dos fornos sidewell e o restante do kiln de reciclagem. Considerou-se que essa energia térmica seria recuperada via um trocador de calor, onde um circuito intermediário contendo um fluido térmico seria responsável por alimentar o ORC nas condições de temperatura para o evaporador projetadas pelo fabricante da máquina. As perdas de calor entre a fonte quente e o ORC foram consideradas de 15% (conforme as premissas mencionadas na introdução do capítulo).

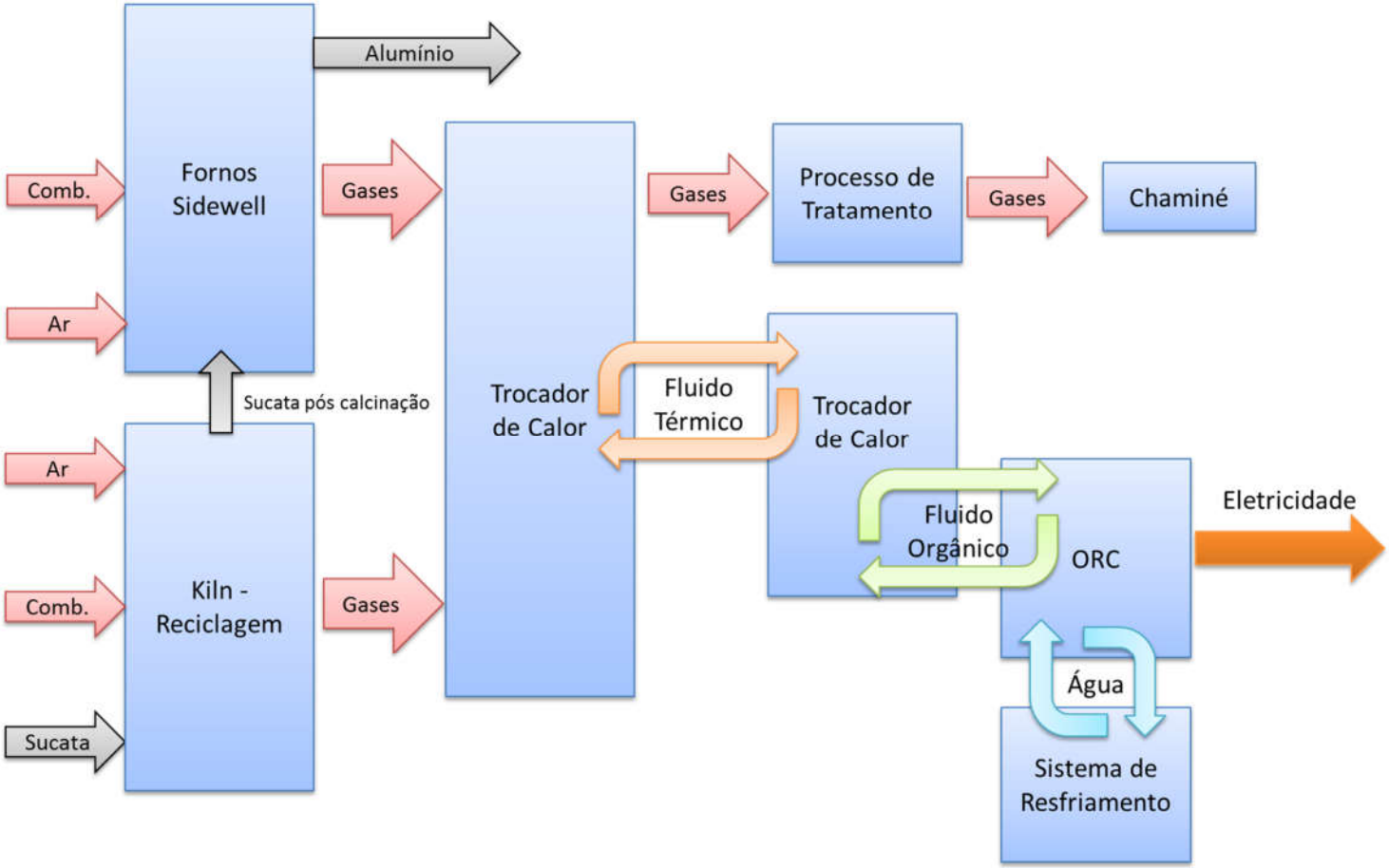


Figura 75 - Fluxograma da recuperação de calor na reciclagem de alumínio

4.5.3 – Análise Exergética do Ciclo ORC

A seguir são apresentados os resultados da análise exergética para o estudo de caso na indústria de alumínio utilizando ciclopentano como fluido de trabalho. Os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice II.

A Tabela 76 mostra os resultados da eficiência exergética do ORC em função da vazão e razão de pressão na bomba, sendo o valor máximo obtido de 31,2%.

TABELA 76 - RESULTADOS DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA INTERNA [%] UTILIZANDO O CICLOPENTANO COMO FLUIDO DE TRABALHO - ALUMÍNIO.

		Razão de Pressão na Bomba								
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Flow [kg/s]	**12**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	15	20,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	16	20,4	22,5	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	17	20,6	22,8	24,7	26,4	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	18	20,8	23,0	25,0	26,8	28,4	29,8	**31,2**	0,0	0,0
	19	21,0	23,3	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A Tabela 77 presenta a destruição exergética obtida para o ponto ótimo da Tabela 76.

TABELA 77 – RESUMO DOS RESULTADOS PARA OS PONTOS ÓTIMOS OBTIDOS

Fluido	**Efic. Exergética (%)**	**Vazão [kg/s]**	**PR**
Ciclopentano	31,2	18	12
Pentano	29,7	20	12
R123	27,3	42	10
R245fa	28,7	39	13

A destruição exergética obtida para os pontos ótimos é mostrada na Tabela 78 . Onde, de acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto o R245fa resultou na maior destruição exergética.

TABELA 78 – DESTRUIÇÃO EXERGÉTICA [KW] NOS PONTOS ÓTIMOS OBTIDOS

	Evaporador	**Condensador**	**Regenerador**	**Turbina**	**Total**
Ciclopentano	1513,7	811,5	165,9	223,8	**2717,7**
R123	2266,5	307,1	167,9	307,1	**2965,3**
Pentano	1897,1	553,25	114,6	232,2	**2800,3**
R245fa	2589,0	191,3	76,4	255,3	**3115,7**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados.

Os resultados indicam que o ciclopentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R123 apresentou os piores resultados para as condições simuladas, Tabela 79.

TABELA 79 – RESULTADOS DE POTÊNCIA E EFICIÊNCIA TERMODINÂMICA

Fluidos	**Potência Líquida [kW]**	**Eficiência [%]**
Ciclopentano	1763,4	17,1
R123	1542,3	14,9
Pentano	1678,7	16,2
R245fa	1619,8	15,7

Os resultados termodinâmicos detalhados, considerando cada estado termodinâmico são apresentados em detalhes no apêndice.

4.5.4 Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

Para a análise econômica do estudo de caso do setor de alumínio, foi feito uso das estimativas iniciais do modelo termodinâmico para a seleção de uma unidade comercial, de acordo com a Tabela 40.

A Tabela 80 mostra os parâmetros estimados para a potência elétrica do sistema ORC.

Tabela 80 – Resultado da Potência elétrica estimada para modulo ORC.

Considerações Técnica	
Fonte Quente	
Disponibilidade de Calor (MW)	10,37
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	8,78
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	1,93

A Tabela 81 mostra os custos de instalação obtidos para o caso estudado.

Tabela 81 – Estimativa do CAPEx.

Investimento (milhares de USD)	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Sistema Principal			
Modulo ORC	2.326	2.558	2.442
Equipamentos Auxiliares	494	658	576
Trocador de Calor	1.152	1.579	1.365
Estrutura			
Engenharia Básica	193	290	241
Projeto Executivo e Outros	386	579	483
Instalação			
Conexão à Rede	97	193	145
Instalação	386	772	579
Total	**5.033**	**6.630**	**5.831**
Custo Específico (USD/kW)	**2.606**	**3.433**	**3.020**

Para o projeto de recuperação na indústria de reciclagem de alumínio, foi considerada uma disponibilidade variando entre 85% e 90% do total de horas anuais. A Tabela 82 mostra os valores considerados.

Tabela 82 - Estimativas do OPEx

Opex	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (horas/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção Anual (US$/ano)	106.571	172.544	139.557
Manutenção (US$/kWh)	7,0	12,0	9,5
Total (USD/ano)	**106.571**	**172.544**	**139.557**

Os três cenários de hipóteses foram analisados: pessimista, médio e otimista, sendo os cálculos financeiros realizados de ano a ano, a Tabela 83 é apresentado o fluxo de caixa resultante para o caso médio.

Tabela 83 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio (Alumínio)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685	1.349.685
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**	**1.349.685**
Despesas		(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)	(139.557)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**
PP&E Bruto	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399	6.414.399
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**	**6.414.399**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127	1.210.127
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(6.414.399)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(6.414.399)**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**	**1.210.127**
FC Acumulado	(6.414.399)	(5.204.272)	(3.994.144)	(2.784.017)	(1.573.890)	(363.763)	846.364	2.056.491	3.266.618	4.476.746	5.686.873

A Tabela 84 é uma tabela-resumo dos resultados obtidos para os três casos analisados. Os fluxos de caixa dos mesmos são apresentados na Figura 76.

Tabela 84 – Resumo do Caso de Estudo (Alumínio)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria / Aplicação		Alumínio		
Fonte Quente		Kiln e Sidewells		
Capacidade da Unidade		600 kt/ano		
Potência Instalada ORC	MW	1,93	1,93	1,93
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	10,33	10,33	10,33
Potência Térmica para ORC	MW	8,78	8,78	8,78
Geração de Energia	MWh/ano	15224,44	14378,64	14801,54
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	3,97	4,80	4,38
Outros Custos	Milhão de US$	1,06	1,83	1,45
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	5,54	7,29	6,41
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		22,8%	14,6%	18,2%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		2.162.161	(144.443)	1.008.859
Payback (Anos)		5	7	6
Custo Específico do Projeto	US$/kW	2866,80	3776,61	3321,71
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	25,18	37,36	31,10

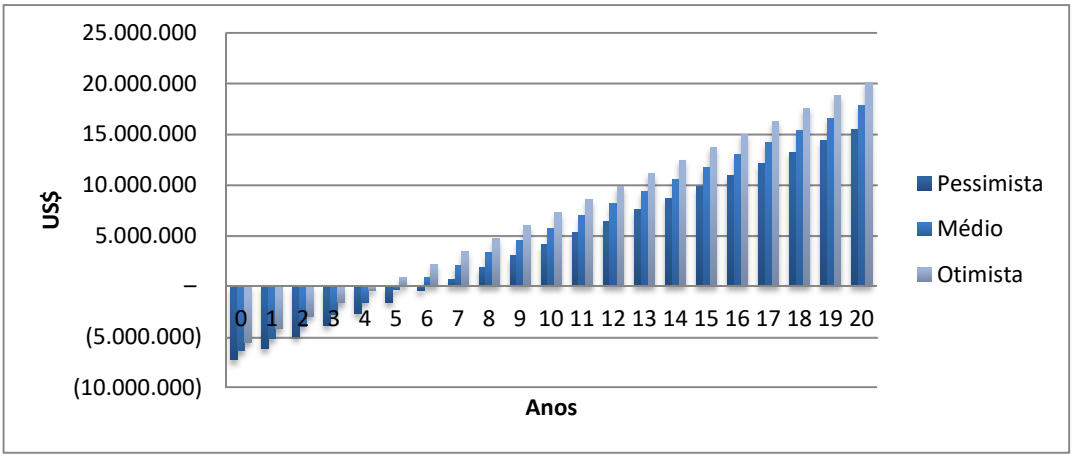


Figura 76 - Resultados para o fluxo de caixa – US$ (Alumínio).

4.6 – Estudo de Caso: Vidros

A fábrica de vidro analisada é localizada em Jundiaí, São Paulo, sendo uma das maiores fábricas de produção de vidros planos do mundo. Contando com três linhas de produção que somam 2440 toneladas de vidro por dia. A Figura 77 mostra uma vista aérea da fábrica, onde é possível ver as três linhas de produção da unidade.

Figura 77 - Vista aérea da Fábrica de Vidro visitada

As linhas de produção possuem as seguintes capacidades:

- Linha 1: 920 toneladas/dia
- Linha 2: 900 toneladas/dia
- Linha 3: 620 toneladas/dia

4.6.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

Os equipamentos principais das linhas de produção de vidro plano da fábrica estudada são os fornos de fusão. É comum que os gases de exaustão desse processo sejam resfriados para posteriormente serem tratados antes de emitidos para a atmosfera. A Figura 78 mostra um fluxograma do processo da fábrica em questão.

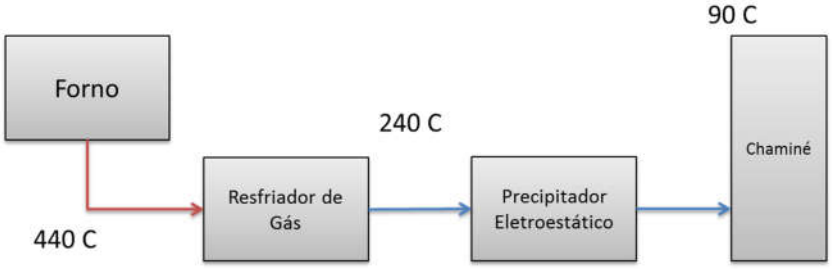


Figura 78 – Processo de produção de vidro na fábrica analisada.

Os dados de operação indicam uma temperatura média de 440°C na exaustão do forno, sendo os gases resfriados até 240°C para o tratamento num precipitador eletroestático. Finalmente, após o tratamento, os gases são liberados para a atmosfera com uma temperatura de 90°C.

O volume dos gases de exaustão varia em cada linha de produção, sendo os valores informados mostrados na Tabela 85.

Tabela 85 – Dados de Operação das Linhas de Produção

	Vazão [Nm³/h]	Temperatura [°C]
Linha 1	80000	440
Linha 2	78000	440
Linha 3	54000	440

Enquanto a composição química é apresentada na **Tabela 88**.

Tabela 86 - Composição química da exaustão dos fornos de vidro

Elemento	%
CO_2	9,0
Ar	0,8
H2O	13,0
N_2	72,8
O_2	4,4

Fonte: (BEERKENS, 1986)

Fazendo uso das vazões, temperaturas e composição química apresentadas anteriormente e considerando a pressão dos gases levemente superior à atmosférica (101,4 kPa), e que o trocador de calor responsável por fornecer energia ao ORC seria instalado em paralelo com o sistema de arrefecimento de gases (como já mostrado na Figura 57) operando com uma variação de temperatura entre 440 e 240 °C, tem-se para as linhas de produção de vidro uma potência térmica de 6,9 MW, 6,7 MW e 4,6 MW, respectivamente. Ou seja, um total de 18,3 MW térmicos. A Figura 79 ilustra a configuração proposta para a recuperação de calor nas 3 linhas de produção da fábrica, fazendo uso de um único módulo ORC para produção de eletricidade.

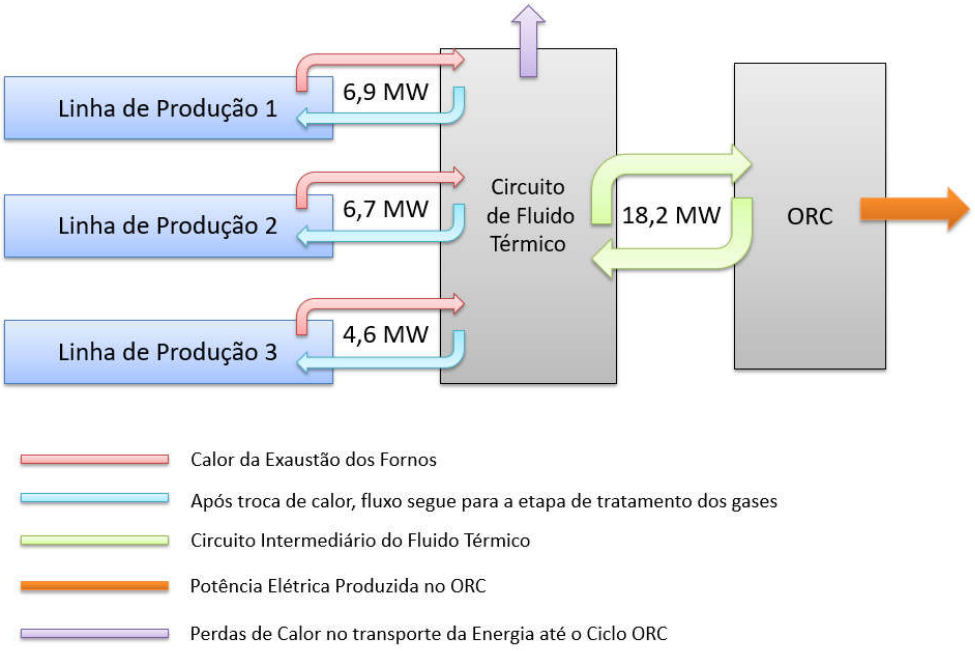


Figura 79 - Configuração do Sistema Proposto.

4.6.2 – Análise Exergética do Ciclo ORC

A seguir são apresentados os resultados da análise exergética para o estudo de caso na indústria de vidros utilizando ciclopentano como fluido de trabalho. Os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo e o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice II.

A Tabela 87 mostra os resultados da eficiência exergética do ORC em função da vazão e razão de pressão na bomba, sendo o valor máximo obtido de 21,9%.

Tabela 87 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o ciclopentano como fluido de trabalho - vidros.

		Razão de Pressão na Bomba								
		6	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Flow [kg/s]	**26**	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	27	14,1	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	28	14,2	15,7	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	29	14,3	15,8	17,1	18,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30	14,4	15,9	17,3	18,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	31	14,5	16,0	17,4	18,6	19,7	20,7	0,0	0,0	0,0
	32	14,6	16,1	17,5	18,7	19,9	20,9	**21,9**	0,0	0,0
	33	14,7	16,2	17,6	18,9	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	34	14,7	16,3	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	35	14,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	36	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A **Tabela 88** apresenta a destruição exergética obtida para o ponto ótimo da **Tabela 87**.

Tabela 88 – Resumo dos resultados para os pontos ótimos obtidos

Fluido	Efic. Exergética (%)	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	21,9	32	12
Pentano	21,0	37	12
R123	19,2	76	10
R245fa	20,1	70	13

A destruição exergética obtida para os pontos ótimos é mostrada na Tabela 89. Onde, de acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto, mais uma vez, o R245fa resultou na maior destruição exergética.

Tabela 89 – Destruição Exergética [kW] nos pontos ótimos obtidos

	Evaporador	Condensador	Regenerador	Turbina	Total
Ciclopentano	2593,2	1252,9	294,7	397,9	**4543,7**
R123	3956,6	339,9	264,5	398,3	**4964,3**
Pentano	3315,3	779,1	120,2	426,0	**4647,4**
R245fa	4516,0	128,9	119,7	456,9	**5228,3**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados. Os resultados indicam que o ciclopentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R123 apresentou os piores resultados para as condições simuladas.

Tabela 90 – Resultados de potência e eficiência termodinâmica

Fluidos	Potência Líquida [kW]	Eficiência [%]
Ciclopentano	3134,7	17,1
R123	2746,5	15,0
Pentano	3016,4	16,4
R245fa	2881,5	15,7

Os resultados termodinâmicos detalhados, considerando cada estado termodinâmico são apresentados em detalhes no apêndice.

4.6.3 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

Conforme as premissas básicas, assumindo uma perda de 15% do calor disponível na fonte quente no transporte da energia até o ORC e uma eficiência de conversão do ORC de 22% (mesma premissa de redução de eficiência adotada nos estudos de casos apresentados anteriormente), a energia disponível nas fontes quentes seria suficiente para a produção de 3,4 MW de potência elétrica, como apresentado na Tabela 91.

Tabela 91 – Resultado da Potência elétrica estimada para modulo ORC.

Considerações Técnicas	
Fonte Quente	
Disponibilidade de Calor (MW)	18,3
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	15,6
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	3,42

A Tabela 92 mostra os custos de instalação obtidos para o caso estudado.

Tabela 92 - Estimativa dos Custos de Investimento.

Investimento (milhares de USD)	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Sistema Principal			
Modulo ORC	4.244	4.651	4.448
Equipamentos Auxiliares	938	1.053	995
Trocador de Calor	2.468	3.027	2.747
Estrutura			
Engenharia Básica	342	513	428
Projeto Executivo e Outros	684	1.027	856
Instalação			
Conexão à Rede	205	342	274
Instalação	719	1.369	1.044
Total	**9.600**	**11.982**	**10.791**
Custo Específico (USD/kW)	**2.805**	**3.501**	**3.153**

Enquanto os custos de operação são apresentados na Tabela 93.

Tabela 93 - Custos Operacionais estimados.

Opex	**Otimista**	**Pessimista**	**Médio**
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (horas/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção Anual (US$/ano)	188.859	305.771	247.315
Manutenção (US$/kWh)	7,0	12,0	9,5
Total (US$/ano)	**188.859**	**305.771**	**247.315**

Os três cenários de hipóteses foram analisados: pessimista, médio e otimista, sendo os cálculos financeiros realizados de ano a ano, na Tabela 94 é apresentado o fluxo de caixa resultante para o caso médio.

Tabela 94 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio (Vidros)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829	2.391.829
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**	**2.391.829**
Despesas		(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)	(247.315)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**
PP&E Bruto	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969	11.869.969
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**	**11.869.969**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514	2.144.514
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(11.869.969)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(11.869.969)**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**	**2.144.514**
FC Acumulado	(11.869.969)	(9.725.455)	(7.580.940)	(5.436.426)	(3.291.912)	(1.147.398)	997.117	3.141.631	5.286.145	7.430.660	9.575.174

A Tabela 95 é uma tabela-resumo dos resultados obtidos para os três casos analisados. Os fluxos de caixa dos mesmos são apresentados na Figura 80.

Tabela 95 - Resumo do Caso de Estudo (Vidros)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria / Aplicação		Vidros		
Fonte Quente		Forno de Vidros Planos		
Capacidade da Unidade		2400 t/dia		
Potência Instalada ORC	MW	3,42	3,42	3,42
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	18,30	18,30	18,30
Potência Térmica para ORC	MW	15,56	15,56	15,56
Geração de Energia	MWh/ano	26979,84	25480,96	26230,40
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	7,65	8,73	8,19
Outros Custos	Milhão de US$	1,95	3,25	2,60
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	10,56	13,18	11,87
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		21,0%	14,2%	17,3%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		3.179.921	(478.605)	1.350.658
Payback (Anos)		5	7	6
Custo Específico do Projeto	US$/kW	3085,81	3851,43	3468,62
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	26,57	37,86	32,05

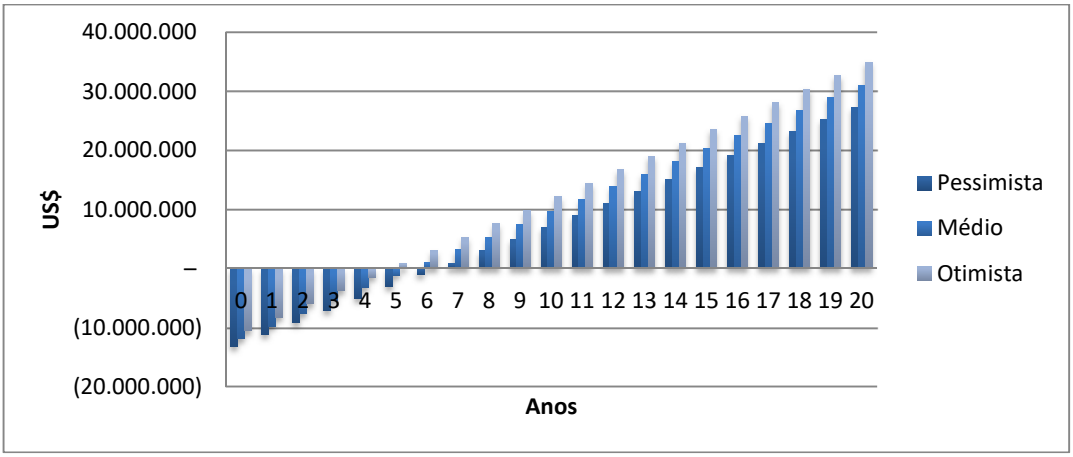


Figura 80 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ - Vidros

4.7 – Estudo de Caso: Cerâmica

A unidade de produção de tijolos analisada para a criação de um estudo de caso para o setor cerâmico brasileiro possui um porte consideravelmente inferior ao tipo de fábrica analisada para os demais estudos de caso, não sendo parte de um grande grupo industrial. Essa é uma característica do setor de cerâmica vermelha no Brasil, com pequenas unidades produtivas e, muitas vezes, processos produtivos bem menos sofisticados quando comparados com setores como siderurgia, alumínio e cimento.

Dessa forma, por apresentar um "porte" menor, estima-se que a quantidade de calor disponível para recuperação de calor de processo deva ser inferior. Por outro lado, um grande conjunto de fábricas de cerâmica no Brasil faz uso de biomassa como combustível primário para os fornos de produção, logo nesse estudo de caso foi proposto um sistema ORC híbrido, que utilize parte da energia proveniente dos gases quentes dos fornos e também uma queima suplementar de biomassa para gerar mais energia térmica para a produção de eletricidade no ORC.

Figura 81 - Vista aérea da fábrica analisada (cerâmica).

A fábrica selecionada para o estudo de caso é localizada no estado do Rio de Janeiro, na cidade de Paraíba do Sul. A unidade já faz uso de biomassa renovável em substituição aos combustíveis fósseis para o processo de produção de tijolos, possuindo um excedente que poderia ser utilizado para a geração de eletricidade. Apesar da pequena demanda de potência da unidade, de cerca de 0,5 MW, a empresa tem interesse em disponibilizar a energia gerada na rede para comercialização, e essa opção será analisada nesse estudo.

4.7.1 – Locais passíveis de recuperação de calor

Conforme mencionado na seção anterior, a configuração proposta para um sistema ORC na cerâmica pôde ser estruturada a partir de um sistema simples de recuperação de calor ou a partir de um sistema híbrido: contando com recuperação de calor dos gases de exaustão do forno de produção de tijolos, combinada com o calor proveniente da queima de biomassa (cavaco de madeira) em uma fornalha.

O fluxograma do processo híbrido é mostrado na Figura 82.

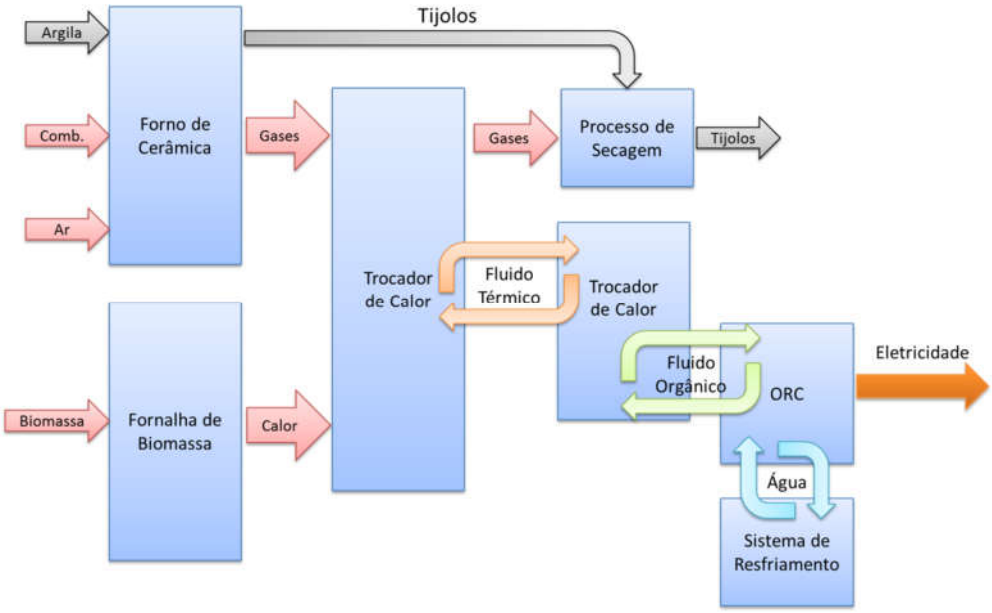


Figura 82 - Fluxograma de Processo para produção de eletricidade na indústria cerâmica.

A produção de tijolos na fábrica se dá em dois fornos, cujos dados da exaustão foram coletados através de um sistema de monitoramento instalado para análise das emissões, por questões ambientais. Os dados coletados são destacados na Tabela 96.

Tabela 96 – Dados de operação das linhas de produção.

	Vazão [Nm³/h]	Temperatura [°C]
Linha 1	3650	725
Linha 2	3650	725

A composição dos gases na exaustão também foi determinada no laudo emitido após o monitoramento dos fornos, sendo os resultados mostrados na Tabela 99.

Tabela 97 - Composição química da exaustão dos fornos de cerâmica

Elemento	% base seca
CO_2	6,5
N_2	79,8
O_2	13,7
CO (ppm)	707

Peso Molecular Seco = 29,59

Fonte: (WS ENGENHARIA AMBIENTAL, 2012)

Apesar da pequena vazão dos gases de exaustão, a alta temperatura da fonte quente faz com que o aproveitamento se mantenha interessante de ser analisado. Se a temperatura dos gases na saída do trocador de calor for considerada equivalente a 130°C, a disponibilidade de calor calculada a partir da variação de entalpia e da vazão será de 0,85 MW por forno, totalizando 1,7 MW térmicos.

Como a disponibilidade de calor residual é muito baixa, justifica-se a adoção de uma queima suplementar de biomassa para incrementar a quantidade de energia a ser convertida em eletricidade pelo ORC.

Assim, serão estudados nessa seção duas configurações: a) Sistema de Recuperação de Calor Residual Puro; b) Sistema Híbrido (ORC + Queima suplementar de Biomassa).

a) Sistema de Recuperação de Calor Residual Puro (Cerâmica A):

Considerando a energia térmica disponível de 1,7 MW calculada anteriormente e as informações da Tabela 98, foi possível calcular a potência do módulo ORC, de aproximadamente 320 kW.

Tabela 98 – Resultado da potência elétrica estimada para o modulo ORC (Recup. de Calor Pura).

Considerações Técnicas	
Fonte Quente Proc. Industrial	
Disponibilidade de Calor (MW)	1,70
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	1,45
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	22%
Potência do ORC (MWe)	0,318

b) Sistema Híbrido (ORC + Queima suplementar de Biomassa – Cerâmica B).

Ao fazer uso da queima do cavaco de madeira, uma nova fonte térmica é adicionada ao sistema, permitindo elevar a potência instalada em função da quantidade de combustível queimada.

O cavaco de madeira possui um poder calorífico altamente relacionado com a umidade, conforme apresentado na Tabela 99. A variação de quase 50% no poder calorífico inferior (PCI) apresentada entre os teores de umidade de 55% e 25% poderia justificar a adoção de um sistema de aquecimento da biomassa de modo a remover parte da umidade existente. Assim, recomenda-se a utilização de um sistema ORC que disponibilize energia térmica para pré-aquecimento do combustível.

Tabela 99 - Variação do PCI do Eucalipto[15] em função da umidade.

Umidade [%]	PCI do Eucalipto [kcal/kg]
55	1709
45	2218
35	2727
25	3236

Fonte: (INCOBIO, 2017)

A estimativa da energia demandada para a redução do teor de umidade da água de 55% para da 25% é de 0,8 MW térmicos. Tal valor foi calculado a partir da entalpia de vaporização da água, conforme explicitado a seguir:

- Entalpia da água a 25ºC e Patm: 104,9 kJ/kg
- Entalpia do vapor saturado à Patm: 2675,6 kJ/kg
- Demanda de energia para vaporizar água: 2570,7 kJ/kg

Sendo 30% o percentual de massa de água no combustível a ser evaporado (reduzir a umidade de 55% a 25%), a demanda de energia para vaporizar essa quantidade de água no combustível será:

- 2570,7 kJ/kg x 30% = 771,2 kJ/kg de combustível

Logo, considerando a vazão de combustível apresentada na Tabela 100, é possível calcular a potência térmica para a vaporização (produto entre a vazão e o valor de 771,2 kJ/kg), resultando em 0,89 MW térmicos.

Para a produção de mais 11 MW térmicos para alimentação do ORC, seriam necessárias 36.000 toneladas ao ano de cavaco de madeira a uma umidade de 25%, caso consideradas as informações da Tabela 100.

Tabela 100 - Características Do Processo de queima da Biomassa consideradas.

PCI* da Biomassa	13.500	kJ/kg
Eficiência da Fornalha	75	%
Calor produzido	11,56	MW
Demanda de Biomassa	36.000	t/ano

[15] Considerando uma densidade média de 360 kg/m³.

Dessa maneira, além da disponibilidade térmica proveniente da recuperação de calor do processo industrial (1,7 MW), seriam gerados mais 11,56 MW térmicos através da queima de biomassa, totalizando 13,26 MW.

Assumindo uma perda de 15% do calor no transporte da energia entre a fonte quente do processo industrial e o ORC e uma eficiência de conversão do ORC de 19%[16] (TURBODEN, 2015) e uma eficiência de queima na fornalha de biomassa de 75% (GANAPATHY, 2003), a energia disponível nas fontes quentes seria suficiente para a produção de apriximadamente 2,5 MW de potência elétrica, conforme apresentado na Tabela 101.

Tabela 101 – Resultado da Potência elétrica estimada para modulo ORC.

Considerações Técnicas	
Fonte Quente Proc. Industrial	
Disponibilidade de Calor (MW)	1,70
Eficiência da Troca de Calor (%)	85%
Calor para o ORC (MW)	1,45
Fonte Quente Biomassa	
Disponibilidade de Calor (MW)	15,41
Eficiência da Queima (%)	75%
Calor para o ORC (MW)	11,56
ORC	
Eficiência do Ciclo ORC (%)	19%
Potência do ORC (MWe)	2,47

Com as condições de geração de eletricidade determinadas, pode-se partir para a análise financeira do empreendimento.

[16] A eficiência do ORC foi reduzida, pois o tipo de unidade selecionada faz uso de parte da energia térmica recebida para a evaporação da água no combustível, reduzindo sua umidade.

4.7.2 – Potencial Econômico - Estudo de Viabilidade Econômica

A seguir serão detalhados os resultados econômicos para ambas as opções estudadas, isto é, considerando ou não o sistema de queima suplementar operando com biomassa.

a) Sistema de Recuperação de Calor Residual Puro – Cerâmica A:

A Tabela 102 mostra os custos de investimentos considerados para o sistema de 320 kW, operando sem queima suplementar.

Tabela 102 - Estimativa dos Custos de Investimento – Cerâmica A.

Investimento (milhares de USD)	Otimista	Pessimista	Médio
Sistema Principal			
Modulo ORC	488	581	535
Equipamentos Auxiliares	263	296	280
Trocador de Calor e Fornalha	395	494	444
Estrutura			
Engenharia Básica	38	51	45
Projeto Executivo e Outros	70	95	83
Instalação			
Conexão à Rede	22	35	29
Instalação	57	83	70
Total	**1.334**	**1.635**	**1.484**
Custo Específico (USD/kW)	**4.196**	**5.143**	**4.669**

Os custos de operação são apresentados na Tabela 106.

Tabela 103 - Custos Operacionais estimados – Cerâmica A.

Opex	Otimista	Pessimista	Médio
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (hours/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção Anual (US$/ano)	20.176	32.666	26.421
Manutenção (US$/kWh)	8,1	13,8	10,9
Custo com Comb. (US$/tonelada)			
Custo anual com Comb. (US$/ano)	-	-	-
Total (US$/ano)	**20.175,90**	**32.665,75**	**26.420,83**

A seguir são apresentados os resultados obtidos no modelo financeiro

A seguir são exibidos os resultados financeiros obtidos para o caso “médio” sem queima suplementar.

Tabela 104 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio (Cerâmica A)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Consumida (MW)		0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Potência para o Grid (MW)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		222.192	222.192	222.192	222.192	222.192	222.192	222.192	222.192	222.192	222.192
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**	**222.192**
Despesas		(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)	(26.421)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**
PP&E Bruto	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837	1.632.837
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**	**1.632.837**
Lucro Líquido	–	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771	195.771
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(1.632.837)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(1.632.837)**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**	**195.771**
FC Acumulado	(1.632.837)	(1.437.066)	(1.241.295)	(1.045.524)	(849.753)	(653.982)	(458.211)	(262.440)	(66.669)	129.102	324.873

A Tabela 105 é uma tabela-resumo dos resultados obtidos para os três casos analisados. Os fluxos de caixa dos mesmos são apresentados na Figura 84.

Tabela 105 – Resumo do Caso de Estudo (Cerâmica A)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria / Aplicação		Cerâmica		
Fonte Quente		Forno de Produção de Tijolos		
Potência Instalada ORC	MW	0,32	0,32	0,32
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	0,00	0,00	0,00
Potência Térmica para ORC	MW	1,45	1,45	1,45
Thermal Power to Thermal Users	MW	0,00	0,00	0,00
Geração de Energia	MWh/ano	2506	2367	2437
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	1,15	1,37	1,26
Outros Custos	Milhão de US$	0,19	0,26	0,23
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	1,47	1,80	1,63
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		13,0%	8,0%	10,3%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		(141.835)	(566.759)	(354.297)
Payback (Anos)		8,00	10,00	9,00
Custo Específico do Projeto	US$/kW	4615,70	5656,94	5136,32
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	37,32	51,79	44,35

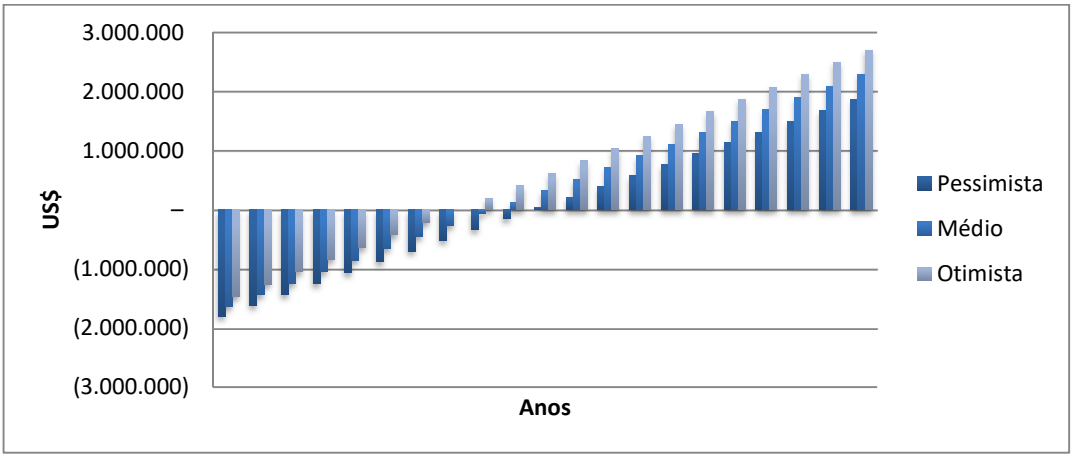


Figura 83 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Cerâmica A)

b) Sistema Híbrido (ORC + Queima suplementar de Biomassa) – Cerâmica B.

A Tabela 106 mostra os custos de instalação obtidos para o caso considerando o sistema com biomassa e calor de rejeito.

Tabela 106 - Estimativa dos Custos de Investimento – Cerâmica B.

Investimento (milhares de US$)	Otimista	Pessimista	Médio
Sistema Principal			
Modulo ORC	3.605	4.070	3.837
Equipamentos Auxiliares	888	1.020	954
Trocador de Calor e Fornalha	2.632	3.290	2.961
Estrutura			
Engenharia Básica	247	371	309
Projeto Executivo e Outros	494	741	618
Instalação			
Conexão à Rede	124	247	185
Instalação	371	618	494
Total	**8.360**	**10.356**	**9.358**
Custo Específico (US$/kW)	**3.384**	**4.192**	**3.788**

Os custos de operação são apresentados na Tabela 107. Onde merece destaque os valores de aquisição do combustível, um custo importante que não é considerado nos sistemas de recuperação de calor puros.

Tabela 107 - Custos Operacionais estimados – Cerâmica B.

Opex	Otimista	Pessimista	Médio
Disponibilidade (%)	90%	85%	88%
Horas de Operação (horas/ano)	7.884	7.446	7.665
Manutenção Anual (US$/ano)	156.800	253.867	205.334
Manutenção (US$/MWh)	8,1	13,8	10,9
Custo com Comb. (US$/tonelada)[17]	10,64	12,16	11,40
Custo anual com Comb. (US$/ano)	382.979	437.690	410.334
Total	**539.779**	**691.557**	**615.668**

[17] O custo da biomassa foi baseado no valor de 35 R$/tonelada para o caso otimista e 40 R$/tonelada para o caso pessimista. Esses valores são àqueles tipicamente praticados para aquisição da biomassa na fábrica em 2016.

A seguir são exibidos os resultados financeiros obtidos para o caso “médio” com queima suplementar.

Tabela 108 - Dados Financeiros dos primeiros dez anos do empreendimento – Caso Médio (Cerâmica B)

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Consumida (MW)		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Potência Térmica da F. Quente (kWth)		36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000
Potência para o Grid (MW)		2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		314.521	314.521	314.521	314.521	314.521	314.521	314.521	314.521	314.521	314.521
Venda de Energia para o Grid		1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279	1.412.279
Receitas Totais		**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**	**1.726.800**
Despesas		(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)	(615.668)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**	**1.111.132**
IR		(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)	(26.326)
PIS		(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)	(9.180)
CSLL		(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)	(15.253)
COFINS		(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)	(42.368)
Receita Líquida		**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**
PP&E Bruto	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061	10.294.061
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**	**10.294.061**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005	1.018.005
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(10.294.061)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(10.294.061)**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**	**1.018.005**
FC Acumulado	(10.294.061)	(9.276.056)	(8.258.051)	(7.240.045)	(6.222.040)	(5.204.034)	(4.186.029)	(3.168.024)	(2.150.018)	(1.132.013)	(114.008)

A Tabela 109 é uma tabela-resumo dos resultados obtidos para os três casos analisados. Os fluxos de caixa dos mesmos são apresentados na Figura 84.

Tabela 109 – Resumo do Caso de Estudo (Cerâmica B)

Parâmetro		Otimista	Pessimista	Médio
Indústria		Cerâmica		
Fonte Quente		Biomassa e Forno de Produção de Tijolos		
Potência Instalada ORC	MW	2,47	2,47	2,47
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	15,41	15,41	15,41
Potência Térmica para ORC	MW	13,00	13,00	13,00
Geração de Energia	MWh/ano	19478	18396	18937
Investimento				
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	7,12	8,38	7,75
Outros Custos	Milhão de US$	1,24	1,98	1,61
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	9,20	11,39	10,29
Resultados				
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)		10,8%	4,8%	7,6%
Valor Presente Líquido (20 Anos)		(1.789.084)	(5.031.834)	(3.410.459)
Payback (Anos)		9,00	0,00	11,00
Custo Específico do Projeto	US$/kW	3722,28	4610,93	4166,60
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	281,75	376,38	327,72

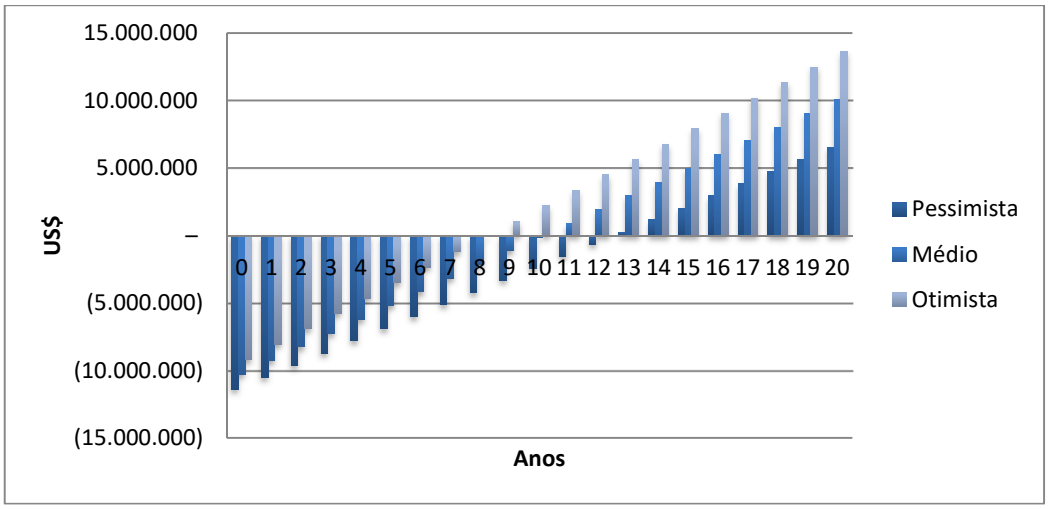


Figura 84 - Fluxo de Caixa Acumulado – US$ (Cerâmica)

4.7.3 – Análise Exergética – Caso A

Como apenas o estudo de caso Cerâmica – Caso A se configura como uma recuperação de calor residual pura, a análise exergética foi realizada apenas para esse caso. A seguir são apresentados os resultados da análise exergética para o estudo de caso na cerâmica, utilizando ciclopentano como fluido de trabalho. Os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo o detalhamento dos cálculos é apresentado no Apêndice II.

A Tabela 76 mostra os resultados da eficiência exergética do ORC em função da vazão e razão de pressão na bomba, sendo o valor máximo obtido de 29,1%.

Tabela 110 - Resultados da eficiência exergética interna [%] utilizando o ciclopentano como fluido de trabalho - alumínio.

		Razão de Pressão na Bomba								
		5	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
Flow [kg/s]	**2,5**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2,9	16,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3,1	16,5	18,7	20,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3,3	16,8	19,0	21,0	22,7	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	3,5	16,9	19,2	21,2	23,0	24,6	26,1	27,4	0,0	0,0
	3,7	17,1	19,4	21,5	23,3	24,9	26,4	27,8	**29,1**	0,0
	3,9	17,1	19,5	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A **Tabela 111** mostra os pontos ótimos obtidos para o estudo de caso.

Tabela 111 – Resumo dos resultados para os pontos ótimos obtidos

Fluido	Efic. Exergética (%)	Vazão [kg/s]	PR
Ciclopentano	29,1	3,7	12
Pentano	27,5	4,0	12
R123	22,1	8	8
R245fa	26,7	8	13

A destruição exergética obtida para os pontos ótimos é mostrada na Tabela 112. Onde, de acordo com os resultados, o ciclopentano e o pentano apresentaram os menores níveis de destruição exergética, enquanto o R245fa resultou na maior destruição exergética.

Tabela 112 – Destruição Exergética [kW] nos pontos ótimos obtidos

	Evaporador	Condensador	Regenerador	Turbina	Total
Ciclopentano	411,9	187,5	30,5	45,9	**676,3**
R123	600,3	97,8	39,7	38,1	**776,3**
Pentano	486,1	136,9	26,6	46,6	**696,9**
R245fa	629,9	64,1	13,6	52,2	**760,6**

Por último, foram calculadas as potências elétricas líquidas e a eficiência energética dos pontos otimizados, apresentados na Tabela 113.

Os resultados indicam que o ciclopentano atingiu os maiores valores de potência elétrica e eficiência energética, enquanto o R123 apresentou os piores resultados para as condições simuladas.

Tabela 113 – Resultados de potência e eficiência termodinâmica

Fluidos	Potência Líquida [kW]	Eficiência [%]
Ciclopentano	359,3	17,1
R123	272,7	13,0
Pentano	339,5	16,2
R245fa	329,3	15,7

Os resultados termodinâmicos detalhados, considerando cada estado termodinâmico são apresentados em detalhes no apêndice.

4.8 – Resumo dos Resultados dos Estudos de Caso

4.8.1 – Resultados da Modelagem Financeira

Os resultados financeiros obtidos para os estudos de caso detalhados na seção anterior foram resumidos de forma a permitir uma análise comparativa. A Tabela 114 mostra o resumo dos resultados obtidos quando consideradas as premissas dos "Cenários Médios" na modelagem técnico-econômica.

A adoção de sistemas ORC para recuperação de calor nos casos de estudo verificados apresentou um valor médio de aproximadamente 3.560 US$/kW instalado, com um custo de geração médio de 33,19 US$/MWh gerado, ambos sem considerar os valores para o caso do setor cerâmico, tendo em vista este ter apresentado uma potência instalada menor, e consequentemente menores ganhos de escala, a Cerâmica – Caso A apresentou custos específicos de 5.136 USD/kW, com um custo médio da eletricidade resultando em 44,35 R$/MWh. A geração híbrida com biomassa (Cerâmica – Caso B) resultou em custos específicos menores que o Caso A, devido à maior potência instalada, porém ocorrem investimentos superiores aos sistemas de recuperação puros devido à necessidade de aquisição de uma fornalha para queima do combustível. O custo específico de investimento resultante foi de 4.167 USD/kW e custo da eletricidade média gerada de 327,72 R$/MWh, valor este consideravelmente mais alto que os demais devido à necessidade de aquisição de combustível a um valor médio de 37,5 R$/tonelada.

Deve-se ressaltar que o estudo de caso da cerâmica B destoa dos demais por não se tratar de um modelo puramente baseado na recuperação de calor residual, fazendo uso também da queima de biomassa para produção de energia térmica. Dessa forma, os resultados financeiros se tornam diretamente dependentes do preço para aquisição da biomassa (combustível), ademais a razão entre produto do processo industrial e energia (ou potência gerada) é distorcida devido à adição de uma fonte auxiliar de energia térmica.

Na Figura 85 são mostrados os tempos de *payback* e as Taxas Internas de Retorno calculadas para os casos analisados, onde vale relembrar que a modelagem não considerou nenhum tipo de alavancagem dos projetos a partir de financiamentos, essa possibilidade que será verificada posteriormente.

As taxas de retorno para os casos de recuperação de calor residual puro variaram entre 10,3% e 18,2%, enquanto os tempos de *payback* são da ordem de 6 a 9 anos, sendo a Cerâmica o setor com os piores resultados, seguida pela siderurgia.

No caso da siderurgia, a disponibilidade do sistema ORC para produção de eletricidade foi considerada inferior aos demais estudos, visto que a recuperação de calor de fornos elétricos a arco é complexa e apresenta grande variação na disponibilidade de calor na fonte quente, impactando assim na energia total gerada anualmente pelo sistema.

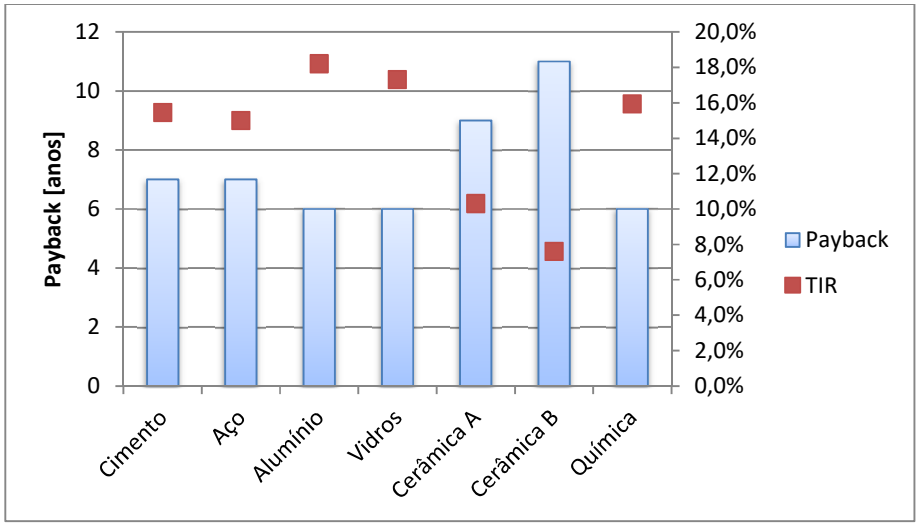


Figura 85 – Tempo de Payback e Taxa Interna de Retorno obtida para os Estudos de Caso analisados

A recuperação de calor na indústria de alumínio apresentou resultados levemente superiores aos demais devido à algumas otimizações de projeto possíveis na fábrica, como a redução de custos com equipamentos auxiliares devido à existência de torres de arrefecimento nas proximidades dos pontos de recuperação de calor, além da otimização dos trocadores de calor das fontes quentes.

Obviamente, é necessário ressaltar que projetos básicos e executivos não foram desenvolvidos para esses estudos de caso, estando, portanto, todos os valores de custos sujeitos a variações em função do nível de detalhamento dos projetos, o resumo dos resultados é mostrado na Tabela 114.

Tabela 114 – Resumo dos resultados obtidos para os Estudos de Caso considerando as premissas do modelo "Médio".

Parâmetro	Unidade	Cimento	Aço	Alumínio	Vidros	Cerâmica A	Cerâmica B	Química
Fonte Quente		Fornos e Resfriamento do Clínquer	Forno Reaquecimento de Tarugo e EAF	Kiln e Sidewells	Exaustão do Fomo de Vidros Planos	Forno de Produção de Tijolos	Biomassa e Forno de Produção de Tijolos	Exaustão dos Fornos da Produção de Negro de Fumo
Capacidade da Unidade	10^3 t/ano	803	1.020	600	876	-	-	75
Potência Instalada ORC	MW	3,16	3,29	1,93	3,42	0,32	2,47	2,49
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	US$/kWh	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Potência Térmica na F. Quente	MW	16,90	17,60	10,33	18,30	0,00	15,41	13,30
Potência Térmica para ORC	MW	14,37	14,96	8,78	15,56	1,45	13,00	11,31
Geração de Energia	MWh/ano	24.224	22.338	14.802	26.230	2.437	18.937	19.064
Investimento								
Custo do ORC e Auxiliares	Milhão de US$	8,62	7,84	4,38	8,19	1,26	7,75	6,11
Outros Custos	Milhão de US$	2,37	2,47	1,45	2,6	0,23	1,61	2,33
Custo Total (+10% contingências)	Milhão de US$	12,09	11,34	6,41	11,87	1,63	10,29	9,28
Resultados								
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)	%	15,5%	15,0%	18,2%	17,3%	10,3%	7,6%	15,9%
Valor Presente Líquido (20 Anos)	USD	267.906	102.269	1.008.859	1.350.658	-354.297	-3.410.459	417.387
Payback	Anos	7	7	6	6	9	11	6
Custo Específico do Projeto	US$/kW	3.825	3.446	3.322	3.469	5.136	4.167	3.729,52
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	34,38	34,64	31,1	32,05	44,35	327,72	33,76
Energia por por tonelada de Produto	MWh/kt ano	30,17	21,90	24,67	29,94	-	-	254,18
Potência por tonelada de Produto	kW/kt ano	3,94	3,23	3,22	3,90	-	-	33,16

Além dos resultados financeiros, é importante fazer menção ao potencial de abatimento de emissões de gases de efeito estufa pela adoção dos ciclos Rankine orgânicos na recuperação de calor industrial, uma vez que a produção de eletricidade via aproveitamento de rejeitos térmicos é livre de emissões, afinal as mesmas já foram contabilizadas no processo de produção industrial. Portanto, cada MWh gerado através de um ORC evita o consumo de eletricidade da rede.

A Figura 86 mostra o histórico dos fatores de emissão do SIN (Sistema Integrado Nacional) no Brasil. Logo, se o fator de emissão médio nos últimos cinco anos do *grid* brasileiro for considerado, equivalente a 0,0984 tCO_2/MWh, pode-se calcular as emissões evitadas para cada um dos casos analisados, conforme exibido na Figura 87.

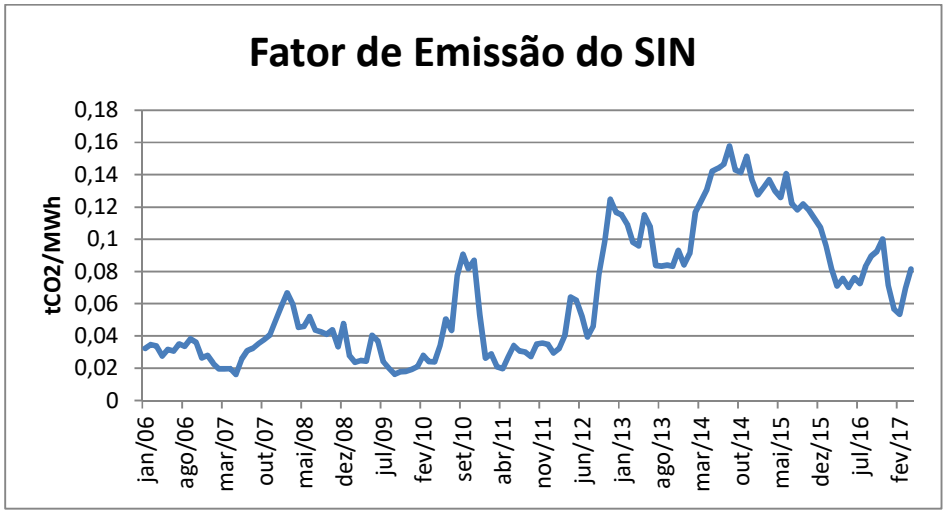


Figura 86 - Histórico do Fator de Emissão do SIN.

Fonte: (MCTI, 2017)

Fazendo-se uso das emissões evitadas pela geração de eletricidade via ORC durante 30 anos de operação da unidade, pôde-se calcular o custo marginal de abatimento (*MAC – Marginal Abatement Cost*) para cada caso estudado, através da seguinte equação (52):

$$\text{MAC} = \frac{\sum_{n=1}^{30} \Delta Custos}{\sum_{n=1}^{30} \Delta Emissões\ Evitadas} \tag{52}$$

Onde os custos ao longo dos anos de operação dever ser trazidos a valor presente a uma taxa "r" a.a..

Os resultados dos custos marginais de abatimento também são exibidos na Figura 87.

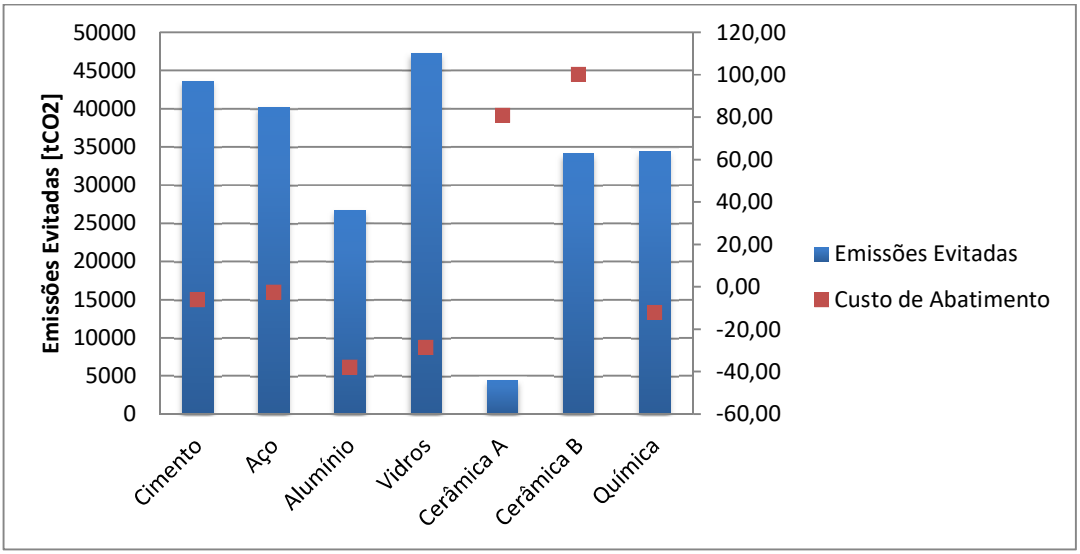


Figura 87 - Emissões evitadas (tCO_2) ao ano e o Custo de Abatimento (USD/tCO_2) para os Estudos de Caso

Como a geração de eletricidade a partir do calor residual via ORCs apresenta custos de eletricidade menores do que o preço de compra de eletricidade da rede (Tabela 114), os MACs calculados foram negativos na ampla maioria casos de recuperação de calor residual, indicando que essa tende a ser uma medida de baixo carbono economicamente viável. Ademais, conforme já destacado anteriormente, as emissões de sistemas de recuperação de calor residual para geração de eletricidade são nulas.

4.8.2 – Resultados da Modelagem Exergética

Após a modelagem termodinâmica dos estudos de caso apresentados anteriormente, foi realizada uma comparação do desempenho termodinâmico dos mesmos, mostrada na Tabela 115.

Observou-se que os resultados de eficiência de primeira lei se mantiveram próximos, entre 16,2% e 17,1%, uma vez que todos os estudos de caso resultaram em pontos ótimos tendo o ciclopentano como fluido de trabalho com razões de pressão na bomba equivalentes a 12. Como os demais parâmetros do ciclo foram mantidos constantes (exceto a vazão do fluido de trabalho), a eficiência de primeira lei não sofre grandes alterações.

TABELA 115 – RESUMO DOS RESULTADOS TERMODINÂMICOS DOS ESTUDOS DE CASO.

Parâmetro	Unidade	Cimento	Aço	Alumínio	Vidros	Cerâmica A	Química
Fonte Quente		Forno e Resfriamento do Clínquer	Forno Reaquecimento de Tarugo e EAF	Forno e *Sidewells*	Exaustão do Fomo de Vidros Planos	Forno de Produção de Tijolos	Exaustão dos Fornos da Produção de Negro de Fumo
Fluido de Melhor Desempenho	-	Ciclopentano	Ciclopentano	Ciclopentano	Ciclopentano	Ciclopentano	Ciclopentano
Potência Líquida do ORC	kW	2.871,9	3.136,3	1.763,4	3.134,7	359,3	2.271,9
Eficiência Energética	%	17,00	17,06	17,06	17,07	17,12	17,0
Eficiência Exergética	%	21,3	34,7	31,2	21,9	29,1	28,8
Destruição Exergética	**kW**	**3.368,7**	**2.297,8**	**2.717,7**	**4.543,7**	**676,3**	**3.538,4**

Entretanto, ao analisar a eficiência exergética dos estudos de caso, verifica-se uma variação considerável. Tendo o cimento apresentado os menores resultados (21,3%) e Ferro-Gusa e Aço os maiores (34,7%).

A Figura 88 mostra os valores absolutos de destruição exergética em cada elemento principal do ciclo ORC para cada estudo de caso em seu ponto ótimo, sendo o caso da indústria de Vidro aquele que apresentou maiores patamares de destruição e a Cerâmica A os menores níveis de destruição. Cabe ressaltar que é esperado que os casos de maior potência instalada apresentem níveis de destruição exergética absoluta maiores do que aqueles de menor potência.

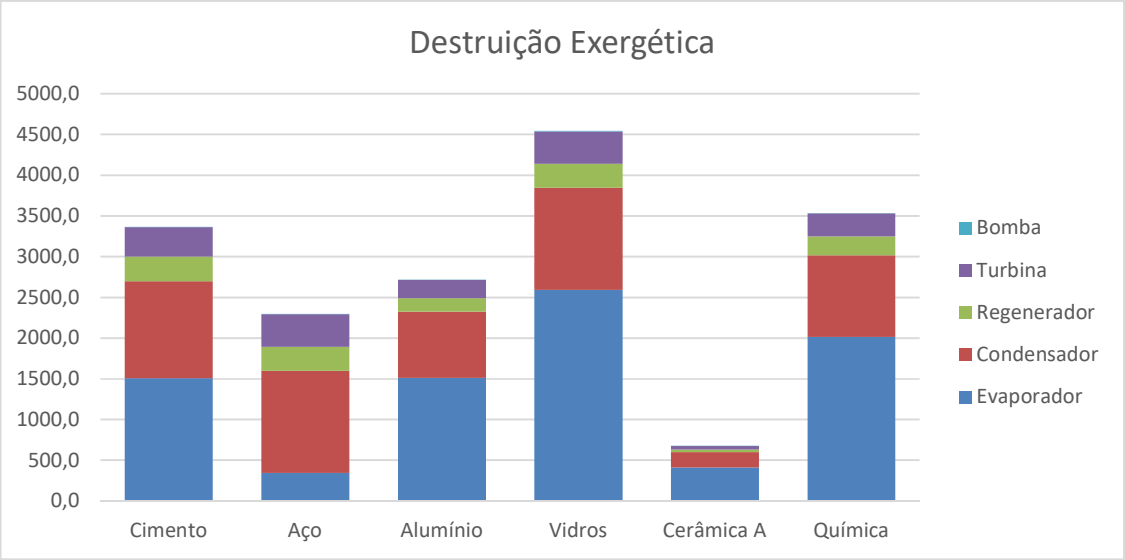


FIGURA 88 – COMPARAÇÃO DA DESTRUIÇÃO EXERGÉTICA NOS ESTUDOS DE CASO.

Na Figura 89 é apresentada uma comparação dos percentuais de destruição exergética por equipamento para cada estudo de caso.

Observa-se a importância de analisar a eficiência exergética em casos de recuperação de calor residual, uma vez que é possível identificar quais estudos de caso causam maiores impactos nas condições da fonte quente através dos níveis de destruição exergética do "Evaporador".

O setor siderúrgico merece destaque devido ao menor percentual de destruição exergética no "Evaporador", estando bem diferente dos valores verificados para os demais casos (entre 45% e 60%). Tal fato corre uma vez que os níveis de vazão médios considerados na fonte quente do ORC para a siderurgia são elevados, logo ao retirar a quantidade de calor demandada para o ORC, a fonte quente não teve sua temperatura tão reduzida como nos demais casos. Isto é, a fonte quente apresentou níveis de degradação menores do que os demais casos.

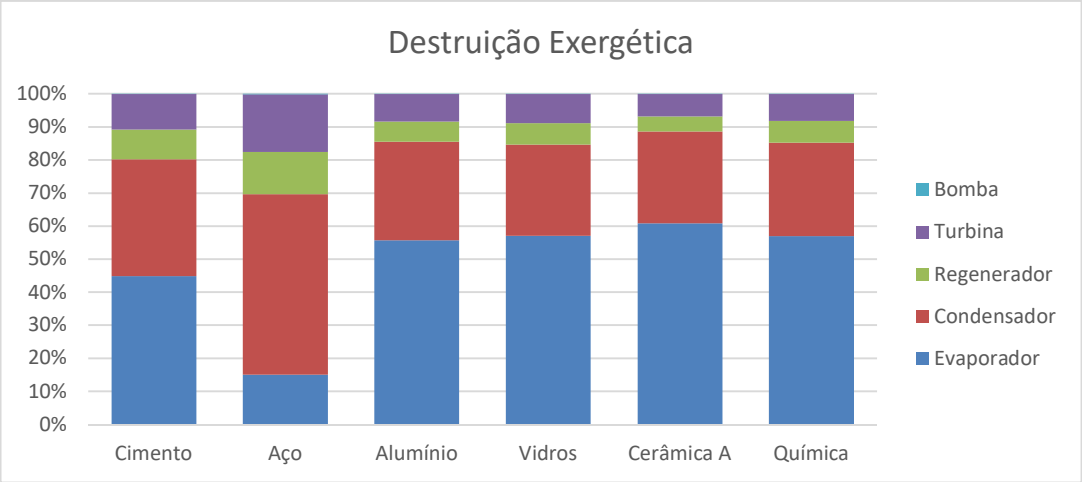


FIGURA 89 - COMPARAÇÃO DO PERCENTUAL DE CADA ELEMENTO DO CICLO NA DESTRUIÇÃO EXERGÉTICA.

É também importante mencionar que a análise exergética da siderurgia é aquela que está sujeita aos maiores níveis de erro em relação à realidade operativa, uma vez que a principal fonte de calor utilizada (o forno *EAF*) possui uma grande amplitude da variação das condições operativas, que são perdidas ao se analisar o caso a partir do cálculo das condições médias da fonte quente.

Em teoria, os menores patamares de destruição exergética no "Evaporador" no estudo de caso da siderurgia indicariam que a fonte quente ainda estaria apta para outros usos, ainda dispondo de calor com temperatura "aproveitável". Entretanto, como já comentado no parágrafo anterior, a grande oscilação das condições operativas do *EAF* é um grande complicador para a melhor utilização dessa energia disponível.

O caso da Cerâmica A apresentou os maiores percentuais de destruição exergética no evaporador, fato explicado pela alta temperatura da fonte quente e baixa vazão dos fornos. Portanto, ao ceder calor para o ORC as condições termodinâmicas da fonte quente são consideravelmente degradadas pela grande redução de temperatura.

4.8.3 – Impacto do Preço da Eletricidade

Visando estudar a viabilidade econômica dos ORCs no Brasil a longo prazo, foi feita uma análise de sensibilidade para os estudos de caso considerando a variação do preço da eletricidade para a indústria[18].

Nessa análise, todos os parâmetros obtidos nos estudos de caso para os cenários "Médios" foram mantidos constantes, exceto o preço da eletricidade, o resultado é exibido na Figura 90.

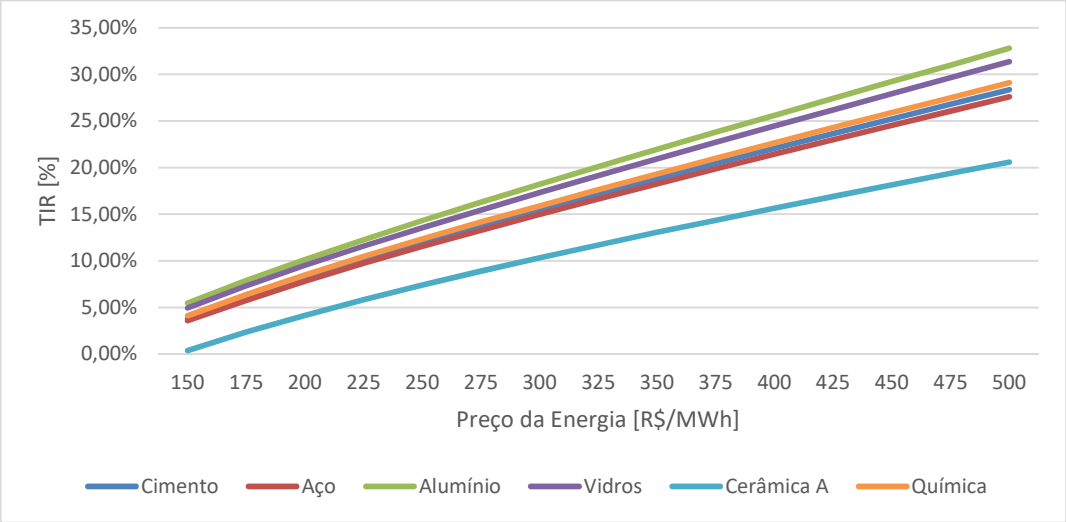


FIGURA 90 - RESULTADO PARA AS TAXAS INTERNAS DE RETORNO EM FUNÇÃO DO PREÇO DA ELETRICIDADE.

Devido ao seu maior custo específico, o caso da cerâmica é aquele que apresenta as menores taxa de retorno, enquanto o cenário de alumínio se destaca atingindo os maiores valores de TIR.

[18] O custo de investimento também foi variado junto com o preço da eletricidade. As tabelas resultantes encontam-se no Apêndice III.

Valores de eletricidade abaixo de 225 R$/MWh apresentam taxas de retorno entre 10% e 12% (exceto para cerâmica que atinge 5,8%), indicando que os investimentos começam a se tornar pouco atrativos nessas condições.

Ao analisar valores de eletricidade superiores a 450 R$/MWh, todos os empreendimentos se tornam extremamente atrativos, com TIR superiores a 25%.

Deve-se ressaltar que o modelo financeiro dessa tese não leva em conta a alavancagem de investimentos e endividamento para execução do empreendimento, sendo assim, dependendo das condições dos financiamentos (percentual do investimento financiado e taxas de juros), as taxas internas de retorno podem ser melhoradas ainda mais, ressaltando assim a importância de linhas de crédito para estimular projetos de recuperação de calor industrial no país.

CAPÍTULO 5 – O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE CALOR UTILIZANDO ORCS NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

5.1 – Introdução

Um estudo sobre o potencial de recuperação de calor e produção de eletricidade via ORC na indústria europeia foi desenvolvido em (H-REII, 2012), onde a recuperação de calor em *EAFs* e fornos de reaquecimento de tarugo, fornos de produção de vidros planos, fornos para produção de clínquer e a exaustão de turbinas a gás em estações de compressão de gás natural foram analisadas. Um potencial teórico de 2,5 GW de potência utilizando sistemas ORC foi calculado, onde cerca 20 TWh/ano de energia poderiam ser obtidos se consideradas 8.000 horas de operação dos sistemas. Esse valor representaria 4,8% do consumo de energia na indústria europeia em 2009 e uma redução de emissões de 7,5 milhões de toneladas de CO_2.

No estudo de (IGEF, 2017) o potencial de mercado de ORCs para recuperação de calor residual na indústria indiana também foi estimado. O uso de ORCs em sistemas termosolares e com biomassa também foram considerados nesse estudo e os resultados mostraram um total de 4,4 GW de potência via ORCs na Índia, onde 574 MW estariam na indústria siderúrgica, 148 MW no setor de cimento e 35 MW na indústria de produção de vidros.

De forma semelhante aos estudos supracitados, foi utilizada uma metodologia para extrapolação dos resultados de cada subsetor analisado em função da capacidade instalada da indústria brasileira. Logo, a partir dos resultados obtidos para os estudos de caso individuais de cada subsetor industrial analisado foi possível estimar o potencial de recuperação de calor via ORC dentro da indústria brasileira.

A partir da capacidade de geração de eletricidade por tonelada de produto produzida para cada caso estudado no capítulo anterior e de um mapeamento da capacidade de produção instalada de cada um dos subsetores analisados levando em conta apenas as unidades produtivas com características semelhantes foi possível calcular um potencial

teórico para instalação de ORCs nos setores de Cimento, Ferro-Gusa e Aço, Químico, Vidro e Alumínio, conforme mostrado na Figura 91.

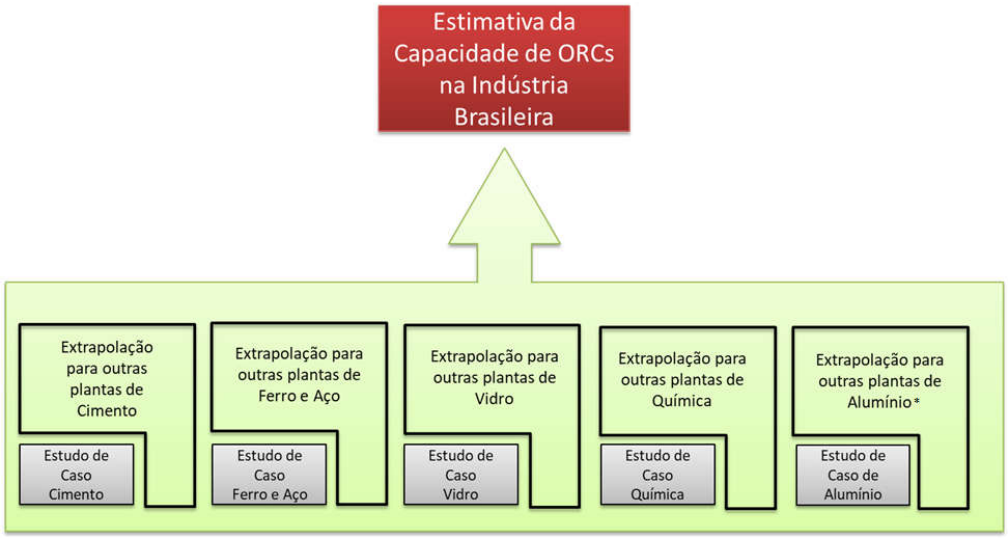


Figura 91 - Esquema explicativo da extrapolação para o cálculo do potencial de ORCs na Indústria brasileira.

*** A extrapolação do setor químico recebeu um tratamento diferenciado**

O subsetor de Cerâmica não foi considerado nessa análise uma vez que o potencial de recuperação de calor nesse setor é consideravelmente inferior aos demais devido ao pequeno porte das unidades produtoras, como verificado no estudo de caso onde se fez uso de um sistema de queima suplementar utilizando biomassa para incremento da capacidade instalada. Ademais, o setor de cerâmicos possui uma pulverização produtiva muito grande, com unidades fabris com diversos tipos de fornos, muitas vezes muito rudimentares (INT, 2012). Entretanto, a adoção de ORCs nesse setor não deve ser completamente desconsiderada, principalmente caso exista disponibilidade de biomassa a baixo custo na localidade.

O setor químico recebeu uma análise especial devido às características da fábrica abordada no estudo de caso, que dificultam uma análise mais vertical no país. As premissas utilizadas para a Química serão tratadas com mais detalhes na próxima seção.

A seguir serão apresentados os cálculos para os subsetores estudados.

5.2 – Cálculo do Potencial de Geração

O cálculo do potencial de geração nos setores industriais brasileiros é feito a partir da extrapolação dos resultados obtidos nos estudos de caso, fazendo uso da produção de cada subsetor no país.

Os dados apresentados na Tabela 116 foram obtidos no Anuário Estatístico do Ministério de Minas e Energia, (MME, 2017), entretanto o valor da produção de aço por rota em 2015 não estava disponível nos anuários do MME, sendo o valor de produção por *EAFs* calculado a partir da informação do anuário estatístico de 2012 do Instituto Aço Brasil (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013), onde a produção de aço via *EAFs* representou 23% do total do país. O mesmo percentual foi considerado para o ano de 2015, conforme mostrado na Tabela 116.

Tabela 116 - Dados de Produção dos Setores da Indústria Analisados

Setor	Produção Anual 2015 t/ano	Capacidade Instalada 2015 t/ano
Cimento	65.282.970	93.000.000
Aço Total	33.256.000	48.900.000
Aço EAF[19]	7.648.880	10.410.000
Alumínio Primário	772.200	935.000
Alumínio Reciclado	602.000	602.000[20]
Vidros Planos	1.788.007	2.502.000

Fonte: (MME, 2017)

Para o setor de alumínio será considerada apenas a rota de produção por reciclagem, uma vez que os fornos nesse processo estão de acordo com aqueles verificados no estudo

[19] Calculado a partir do percentual de 23% da produção nacional de aço, valor do ano de 2012 informado por (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).
[20] Devido à falta de informações sobre a capacidade instalada para produção de alumínio reciclado no Brasil, considerou-se a capacidade instalada equivalente à produção de 2015.

de caso. Na siderurgia também foi considerada a produção via rotas EAF separadamente, para permitir a correta extrapolação, conforme descrito posteriormente.

A partir dos cálculos realizados nos estudos de caso, foi possível determinar os potenciais específicos de geração de cada setor em função da capacidade de produção das fábricas. Isto é:

$$e = \frac{E}{C} \tag{53}$$

Onde "E" é a energia elétrica total produzida pelo ORC durante um ano (MWh) e "C" é a capacidade instalada da fábrica analisada (tonelada), sendo "e" a energia gerada por tonelada de produto (MWh / tonelada).

De maneira similar, também foi calculada a potência específica por tonelada de produto:

$$pot = \frac{POT}{C} \tag{54}$$

Onde "POT" é a potência elétrica capaz de ser fornecida pelo ORC em uma determinada instalação (kW) e "C" é a capacidade instalada da instalação analisada (tonelada), sendo "pot" a energia gerada por tonelada de produto (kW / tonelada).

O estudo de caso apresentado para o setor químico nesta tese é referente a uma unidade produtora de negro-de-fumo, produto químico pouco representativo dentro do país. Dessa forma, a extrapolação dos resultados para o cenário nacional não apresentaria potenciais significativos. Assim, visando contornar a falta de representatividade do estudo de caso dentro do segmento industrial química, e ainda manter o setor na análise devido à sua importância dentro da indústria nacional, fez-se uso das informações apresentadas no estudo (DOE, 2008), onde a "Produção de Eteno" norte-americana é colocada como um grande potencial de recuperação de calor residual.

Considerando que a processo produtivo de eteno nos EUA e no Brasil apresentam caraterísticas térmicas semelhantes (DOE, 2008); (ABIQUIM, 2015), fez-se uso das informações de disponibilidade térmica específica (MWh/tonelada de eteno) nos fornos de eteno americanos para se estimar a energia elétrica por tonelada de produto através da

eficiência dos ORCs. Dessa forma foi possível determinar os parâmetros apresentados na Tabela 117 para a indústria química.

A partir das informações de energia, potência e capacidade instalada apresentadas na Tabela 114 foi possível determinar os valores apresentados na Tabela 117.

Tabela 117 - Potencial Específico de Geração via ORC

Parâmetro	Unidade	Cimento	Aço	Alumínio	Vidros	Química[21]
Fonte Quente	-	Forno e Resfriamento do Clínquer	Forno Reaquecimento de Tarugo e EAF	Forno e Sidewells	Exaustão do Forno de Vidros Planos	Exaustão dos Fornos de Eteno
Energia por tonelada de Produto	MWh/kt ano	30,17	21,90	24,67	29,94	125,40
Potência por tonelada de Produto	kW/kt ano	3,94	3,23	3,22	3,90	20,04

Outro setor que demandou uma análise mais específica foi a siderurgia, devido ao processo de recuperação de calor estudado, que possui duas fontes de calor muito distintas: exaustão de EAFs e dos fornos de reaquecimento de tarugo. A recuperação de calor dos EAFs só pode ser realizada na produção de aço via usinas semi-integradas (mini-mills), enquanto a recuperação dos gases dos fornos de reaquecimento de tarugo pode ser realizada em toda a indústria siderúrgica nacional. Logo, é necessário calcular o potencial específico de geração de eletricidade via ORCs de cada fonte de calor, visando fazer a extrapolação corretamente, considerando a aplicabilidade de cada caso. A Tabela 118 mostra os potenciais específicos para ORC calculados a partir do estudo de caso da indústria siderúrgica separados por fonte térmica disponível.

[21] Informações de potencial específico foram obtidas através de (DOE, 2008).

Tabela 118 – Potencial Específico de Geração via ORC para Siderurgia

Parâmetro	Unidade	EAF	Reaq. Tarugo
Energia por tonelada de Produto	MWh/kt ano	22,10	2,22
Potência por tonelada de Produto	kW/kt ano	3,23	0,32

Finalmente, através das informações de capacidade produtiva e produção industrial apresentadas na Tabela 116 e dos potenciais específicos de geração de energia e potência calculados (Tabela 117 e Tabela 118) foi possível calcular os valores apresentados na Tabela 119.

Tabela 119 – Resultados dos potenciais de produção de eletricidade através de calor de rejeito da indústria brasileira.

Setor Industrial	Produção Anual 2015 t/ano	Capacidade Instalada 2015 t/ano	Capacidade de Geração baseada na Capacidade Instalada MWh/ano	Potência baseada na Capacidade Instalada MW
Cimento	65.282.970	93.000.000	2.805.485	366,0
Aço Reaq. Tarugo	33.256.000	48.900.000	108.387	15,9
Aço EAF	7.648.880	10.410.000	230.102	33,7
Alumínio Reciclado	602.000	602.000[22]	14.851	1,94
Vidros Planos	1.788.007	2.502.000	74.918	9,77
Produção de Eteno	3.226.049	3.952.000	495.591	64,6
TOTAL	-	-	**3729334**	**491,9**

Os resultados obtidos indicam que dentre os segmentos industriais analisados, um total de 492 MW poderia ser obtido através de calor residual de processos, sendo esse valor calculado a partir da capacidade instalada de tais segmentos. Desse total, apenas a

[22] Capacidade instalada considerada equivalente à produção devido à falta de dados.

indústria de cimento representa 75% da capacidade, seguida pela produção de eteno (do segmento químico) com 13% e siderurgia com 10%.

O setor de vidros planos, apesar de apresentar bons resultados de viabilidade no estudo de caso, não apresenta uma capacidade instalada significativa no Brasil, o que acaba resultando em um pequeno potencial de geração, representando apenas 2% do potencial calculado.

Por último, o setor de alumínio apresentou os menores resultados com apenas 0,4% do potencial nacional. Entretanto, deve-se frisar que apenas o segmento de reciclagem foi analisado, a produção de alumínio primária não foi contabilizada devido à grande diferença seu processo produtivo e aquele analisado no estudo de caso. Além disso, conforme anteriormente mencionado, o valor exato da capacidade instalada de reciclagem de alumínio no Brasil não foi considerado devido à falta de dados na literatura, fazendo com que os valores considerados para o cálculo do potencial fossem referentes à produção de alumínio (e não à capacidade), consequentemente, reduzindo o potencial final do setor.

A Figura 92 apresenta a participação dos subsetores industriais na capacidade total calculada.

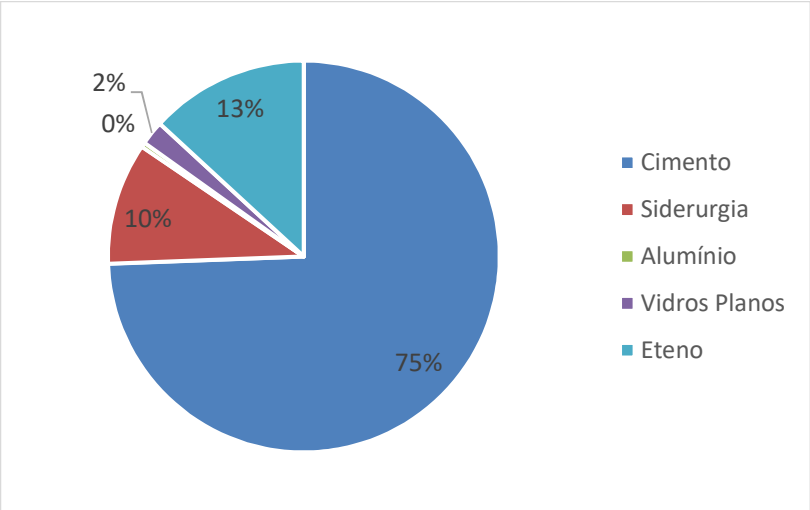


Figura 92 - Participação dos Setores analisados no potencial Brasileira de recuperação de calor residual.

Apresar de não apresentar números de geração significativos quando comparados com a capacidade total de potência elétrica instalada no Brasil, a produção de eletricidade via calor residual se apresenta como uma solução para aumento da eficiência energética na indústria sendo capaz de promover mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor com custos de abatimento negativos.

Segundo (MCTIC, 2016), a indústria brasileira emitiu em 2010 aproximadamente 121,5 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente, sendo cerca de 61% desse total proveniente de processos industriais, conforme detalhado na Tabela 120.

Tabela 120 - Emissões de Gases de Efeito Estufa na Indústria Brasileira - Ano 2010 – Mil toneladas

Setor	Energia	Processo	Total por Setor	Percentual
Alumínio	3.702	3.708	7.410	6,1%
Cal	2.148	5.950	8.098	6,7%
Cimento	14.619	21.288	35.907	29,6%
Ferro-Gusa e Aço	5.557	39.794	45.351	37,3%
Papel e Celulose	5.455	292	5.747	4,7%
Química	13.949	3.488	17.438	14,4%
Vidro	1.429	114	1.543	1,3%
TOTAL	46.859	74.634	121.493	100,0%

Fonte: (MCTIC, 2016)

Na Tabela 121 são exibidos os potenciais de abatimento de CO2 calculados para o potencial de recuperação de calor via ORC, determinados através da energia total gerada e o fator de emissão do SIN.

Tabela 121 - Potencial de Abatimento de CO_2

Setor Industrial	Potencial de Abatimento de CO_2 [$ktCO_2$]
Cimento	252,5
Siderurgia	30,5
Alumínio	1,3
Vidros Planos	6,7
Eteno	44,6
TOTAL	**335,6**

Verificou-se que o total calculado foi de 333,6 mil de toneladas CO2 ao ano, onde na indústria de cimento, o potencial de abatimento resultante de 252,5 mil toneladas CO_2 equivalente a 1,7% das emissões de energia do setor, ou ainda, 0,7% das emissões totais do segmento.

5.3 – Estimativa do Custo de Instalação

A partir do resultado do potencial de cada setor industrial calculado na seção anterior foi possível estimar uma aproximação para os custos de investimento totais de cada setor. Para isso, fez-se uso do custo médio específico de geração calculado para cada setor, conforme mostrado na Tabela 122.

Tabela 122 – Determinação do Custo Estimado de Investimento.

	Potência baseada na Capacidade Instalada [MW]	Custo Específico [US$/MW]	Custo de Investimento [M US$]
Cimento	366,0	3,825	1.400,0
Siderurgia	49,5	3,446	170,7
Alumínio (Reciclagem)	1,9	3,322	6,4
Vidros Planos	9,8	3,469	33,9
Eteno	64,7	3,729	232,8
TOTAL	**491,9**	**-**	**1.843,8**

Os cálculos indicam um custo de aproximadamente 1,84 bilhão de dólares americanos para atingir os 492 MW analisados, lembrando que tal estimativa está sujeita a variações em função das diferentes características de cada projeto, que poderiam impactar positivamente ou negativamente no custo de instalação dos sistemas de eletricidade de energia via calor residual utilizando ORCs. Entretanto o montante serve como um balizador para que se tenha uma ideia dos volumes de capital envolvidos para desbloquear esse potencial no país.

O custo médio total resultante, de cerca de 3,75 M US$/MW é consideravelmente superior ao investimento em fontes de geração convencional, tais como ciclos combinados a gás natural (0,92 MUS$/MW - (EIA, 2013)) e térmicas a carvão (2,93 M US$/MW - (EIA, 2013)). Entretano, as usinas térmicas convencionais supracitadas possuem em alto custo de O&M devido à necessidade de aquisição de combustível, que acabam resultando num custo nivelado da energia mais elevado.

Logo, devido à sua característica não emissora de GEE, os sistemas ORC podem ser comparados com fontes renováveis. Segundo a EIA (2013), o investimento em usinas eólicas onshore é de aproximadamente 2,21 M US$/MW, enquanto em usinas solares seria de 3,87 M US$/MW, mas cabe ressaltar que esses números vêm caindo vertiginosamente ao longo dos últimos anos. Porém, ainda assim, a opção por ORCs se mantêm interessante devido ao seu alto fator de capacidade, acima de 85%, enquanto as fontes renováveis eólicas e solares operam com números significativamente mais baixos, cerca de 45% e 20% respectivamente. Essa carcaterística garante um volume siginificativo de energia gerada por MW instalado nos ORCs.

5.4 – Barreiras relevantes para a penetração de ORCs no Brasil

O desempenho confiável das unidades ORC combinado com sua característica de geração renovável sem emissão de poluentes e o incremento da confiabilidade dos trocadores de calor para recuperação dos gases de exaustão industriais indicam um potencial promissor para a tecnologia nos próximos anos.

De maneira geral, observa-se que as iniciativas de recuperação de calor industrial para geração de eletricidade são positivas tanto do aspecto econômico quanto ambiental, porém apresentando tempos de *payback* que não são comumente praticados na indústria em projetos de eficiência energética, demandando, dessa forma, mecanismos específicos capazes de acelerar sua penetração e promover a disseminação de ORCs em mais países do mundo.

Assim como outras tecnologias de eficiência energética, os ORC enfrentam diversas barreiras para a penetração.

Dentre as barreiras técnicas o principal obstáculo para os sistemas de WHTP é associado ao processo de recuperação de calor, dado que as tecnologias de produção de potência elétrica a partir do calor já estão em estágio comercial, padronizadas e com desempenho comprovado. Por outro lado, o projeto de recuperação de calor tem limitantes técnicas que impactam diretamente na viabilidade econômica do projeto, podendo ser citadas:

- Fontes de calor espalhadas ou com acesso difícil na unidade industrial;
- Processos de operação não contínuos que dificultam o projeto do trocador de calor;
- Fábricas com produção sazonal que podem reduzir a viabilidade do projeto;
- Conteúdo dos gases da fonte quente, onde elementos contaminantes podem estar presentes.

As barreiras técnicas associadas ao uso de ORC são tipicamente analisadas na etapa de estudo e projeto da viabilidade técnica do sistema, variando muito em relação a cada caso específico.

Os aspectos econômicos costumam ser as principais barreiras dos sistemas de recuperação de calor utilizando ORC, principalmente no Brasil onde a taxa de câmbio aumenta consideravelmente o custo da unidade (risco cambial), sendo os tempos de *payback* para a implementação da tecnologia longos e as soluções muito capital intensivas. Ademais, a atual situação econômica do país leva a que o governo realize ajustes fiscais que dificultam ao acesso a crédito por parte do setor industrial. Esse aspecto influencia até mesmo a realização de investimento em medidas viáveis economicamente, pois a conjuntura econômica recessiva afeta a capacidade de financeira das empresas. Essas restrições são percebidas em termos da disponibilidade de capital no mercado de crédito, bem como do aumento da taxa de juros para a concessão de financiamentos. Além disso, percebe-se a existência de assimetria no acesso ao crédito associado ao porte das empresas, o que inibe a realização de investimentos em ações de eficiência energética por médias e pequenas empresas, bem como custos de transação que precisariam ser removidos para a realização de investimentos.

Ainda que a barreira de acesso ao capital possa ser removida, não necessariamente os recursos seriam integralmente destinados para esse propósito, devido à competição com

outros investimentos típicos nas unidades industriais, como os necessários para expandir a capacidade de produção. Em geral, os principais tomadores de decisão na indústria estão sempre tendenciosos a seguir o status quo, que tende a ser menos eficiente e conservador, aplicando recursos em questões de eficiência energética apenas em situações críticas, como escassez de recursos. Dessa forma, é comum observar que investimentos no incremento da capacidade de produção e na penetração de mercado tendem a ser priorizados na indústria (UNIDO, 2013).

Como já mencionado, a situação de crise no país faz com que muitas empresas fiquem relutantes na realização de investimentos capitais intensivos, como a recuperação de calor, ainda mais quando o objetivo consiste na inserção de uma operação que não é a principal das fábricas, podendo aumentar a complexidade do processo operativo das unidades. Essas características fazem com que os investidores demandem taxas de retorno extremamente elevadas a fim de mitigar os riscos do projeto. Ademais, a recessão econômica gerou aumento da aversão a projetos com retornos de longo prazo dependentes de preços futuros variáveis, como o custo da eletricidade.

A obtenção de financiamento dos bancos para projetos de WHTP também é um grande desafio, pois tais sistemas são tecnicamente complexos e combinam o risco associado à geração da eletricidade com o risco inerente da própria fábrica, uma vez que não existe recuperação de calor se a produção da unidade cessar.

Outro fator que deve ser mencionado refere-se ao grande desconhecimento das tecnologias de recuperação de calor, principalmente no Brasil, onde não existem unidades ORC instalados em operação comerciais até a presente data. A ausência de demonstrações das tecnologias e seus benefícios acarreta em resistência para adoção das mesmas no mercado, criando uma barreira comportamental e informacional, dado que muitos atores do setor industrial desconhecem a relação custo-benefício das medidas que resultam em eficientização energética. Ainda assim, mesmo quando os benefícios são conhecidos, é comum inexistir equipe técnica capacitada capaz de identificar, projetar, implementar e monitorar medidas complexas como a recuperação de calor via ORCs (BERGH, 2012) (UNIDO, 2011), principalmente quando se tratam de unidades industriais de médio e pequeno porte.

No nível institucional e regulatório, a obtenção de crédito para o financiamento em atividades de baixo carbono, como os sistemas ORC para recuperação de calor, está sempre condicionada a uma série de exigências burocráticas, onde se pode destacar a apresentação de projetos estruturados e avançados para o acesso a linhas de crédito de programas governamentais.

Além do custo de transação relacionado ao grande número de exigências processuais e para acesso ao crédito, principalmente quando são feitos por bancos de fomento, destaca-se que empresas de médio e pequeno porte têm dificuldade na elaboração de tais projetos, por contar com limitações de mão de obra qualificada para tal propósito (UNIDO, 2011).

Pode-se citar também que a inexistência de padrões de eficientização energética e/ou emissões de carbono, apresenta-se como uma barreira adicional dado que os consumidores de produtos industriais tomam decisões baseadas em preços, desconhecendo a maneira pela qual o produto foi industrializado (DECC, 2015).

Portanto, soluções de eficiência energética podem ser desconsideradas em casos onde não existem arcabouços regulatórios que incentivem sua adoção. No Brasil, o incentivo à eficiência energética tomou maior importância nos últimos anos com a criação de linhas de crédito e incentivos, entretanto, não existem regulações específicas para a recuperação de calor.

5.5 – Incentivos para a Penetração de ORCs no Brasil

Com o objetivo de transpor as barreiras econômicas e de mercado, considerando que a disponibilização de crédito e subvenções econômicas são associadas a políticas monetárias e fiscais, e que a adoção de tecnologias eficientes e de baixo carbono demanda fluxos significativos de crédito para a realização de investimentos, é necessário ampliar a estrutura de captação de recursos por bancos públicos de fomento. Com esse objetivo, as entidades responsáveis pela gestão do Fundo Clima e/ou outros fundos criados para o cumprimento da NDC brasileira deveriam captar recursos junto ao Green Climate Fund (GCF), ao Global Environmental Facility (GEF) e ao Banco Interamericano de

Desenvolvimento (BID), entre outros. Além disso, o crédito disponível nas instituições financeiras deve ser diversificado para atender pequenas, médias e grandes empresas, buscando atingir igualdade na aquisição de financiamento entre os diferentes agentes do setor industrial. Particularmente, as pequenas empresas que não contam com acesso à mão de obra qualificada para adoção de tecnologias mais eficientes, também é possível acessar recursos de assistência técnica do Climate Technology Center Network (CTCN).

O FINEM, do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), contando com recursos do Fundo Clima e das fontes de capital supracitadas seria capaz de custear, com taxas de juros subsidiadas, a aquisição de equipamentos para a indústria, podendo inclusive ser criada uma linha específica de "Eficiência Energética Industrial", que contemplaria as diversas soluções para a indústria, incluindo a adoção de sistemas de recuperação de calor residual para geração de eletricidade.

Ademais, é fundamental minimizar os custos transacionais decorrentes da burocracia exigida pelas instituições financeiras (grande volume de documentos, projetos detalhados, etc.) que afastariam interessados nas linhas de crédito. Assim, é fundamental propor a redução da burocracia da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações de eficiência energética e mitigação de emissões de gases de efeito estufa no setor industrial brasileiro. Entretanto, é sabido que a burocracia visa proteger o setor financeiro de inadimplência, devendo, portanto, esse processo respeitar os limites mínimos para análise de crédito. Dessa forma, visando gerar maior reciprocidade na liberação de crédito, poderia, por exemplo, solicitar a exigência de contrapartidas como a apresentação de inventários corporativos e metas de eficientização energética e emissão de GEEs

Um critério relevante que deve ser respeitado, em particular para financiamento de equipamentos com alto custo de capital (como as unidades ORC) para médias e pequenas empresas, é a apresentação de projetos de viabilidade técnico-econômica. Porém, devido à dificuldade que muitas empresas possuem em termos de mão de obra qualificada para esse propósito, poderiam ser criadas parcerias público-privadas para treinamentos na realização de projetos técnico-financeiros das ações de eficientização e redução de GEEs.

Outro ponto importante é o incentivo a uma cultura organizacional focada em ações de eficientização energética, podem ser implementados mecanismos de auditoria

energética, que serviriam como um incentivo para empresas que buscam acessar condições diferenciadas de crédito oferecidos por bancos públicos de fomento.

Finalmente, todos os instrumentos regulatórios anteriormente mencionados poderiam ser pré-requisitos para um "Selo de Eficiência Energética Industrial", responsável por dar acesso a condições especiais de crédito junto a bancos públicos de fomento, além de ser exigido para participação de empresas do setor em processos licitatórios.

Adicionalmente, em particular nos casos como a adoção de sistemas ORC na indústria, os instrumentos de política pública devem buscar a minimização da resistência existente à entrada dessas novas tecnologias. A barreira associada à falta de conhecimento dos benefícios das tecnologias poderia ser superada por meio da realização de ações de sensibilização, informação e capacitação.

Outra maneira de desenvolver conhecimento no país, além de financiar a instalação de unidades piloto no Brasil seria através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fazendo uso de chamadas públicas com editais incentivando o estudo e desenvolvimento de projetos de recuperação de calor residual na indústria com ORCs. Além desse programa, na própria ANEEL há o Programa de Eficiência Energética, que apesar de contar com a grande maioria de seus recursos destinados a ações em clientes de baixa renda, também possui verbas destinadas à eficiência energética em unidades industriais.

Assim, de maneira resumida, a Figura 93 resume o processo de incentivos tratados nessa seção que poderiam fomentar a penetração dos sistemas de recuperação de calor com ORCs no Brasil.

Figura 93 - Esquema dos incentivos sugeridos para incentivar o potencial de ORCs no Brasil

5.5.1 – O Efeito das Condições de Crédito na Viabilidade dos Projetos de Recuperação de Calor Residual

Dentre todas as questões que dificultam a penetração dos sistemas de recuperação de calor industrial para produção de eletricidade comentadas na seção 5.4, aquela que merece maior destaque é a barreira econômica e de mercado, associada à dificuldade de acesso aos volumes de capital demandados para a execução do projeto, principalmente num contexto de recessão econômica como o atualmente enfrentado pelo país.

Foi observada uma alta sensibilidade da taxa de retorno dos empreendimentos em relação ao custo de investimento do sistema nos estudos de caso quando comparados os resultados dos cenários "Pessimistas" e "Otimistas", evidenciando a barreira econômica existente. A Tabela 123 e a Figura 94 mostram a variação das taxas de retorno analisadas.

Tabela 123 - Resultados Financeiros dos estudos de caso analisados - Cenários Otimista, Médio e Pessimista

Setor	Parâmetro	Pessimista	Médio	Otimista
Cimento	Taxa de Retorno	12,4%	15,5%	19,2%
	Custo Específico [US$]	4293	3825	3357
Aço	Taxa de Retorno	10,8%	15,0%	20,1%
	Custo Específico [US$]	3910,8	3446	3036
Alumínio	Taxa de Retorno	14,6%	18,2%	22,8%
	Custo Específico [US$]	3777	3322	2887
Vidros	Taxa de Retorno	14,2%	17,3%	21,0%
	Custo Específico [US$]	3851	3469	3086
Cerâmica A	Taxa de Retorno	8,0%	10,3%	12,9%
	Custo Específico [US$]	5657	5136	4616
Cerâmica B	Taxa de Retorno	4,7%	7,6%	10,8%
	Custo Específico [US$]	4611	4167	37722
Química	Taxa de Retorno	12,6%	15,9%	20,8%
	Custo Específico [US$]	4505	3729	2954

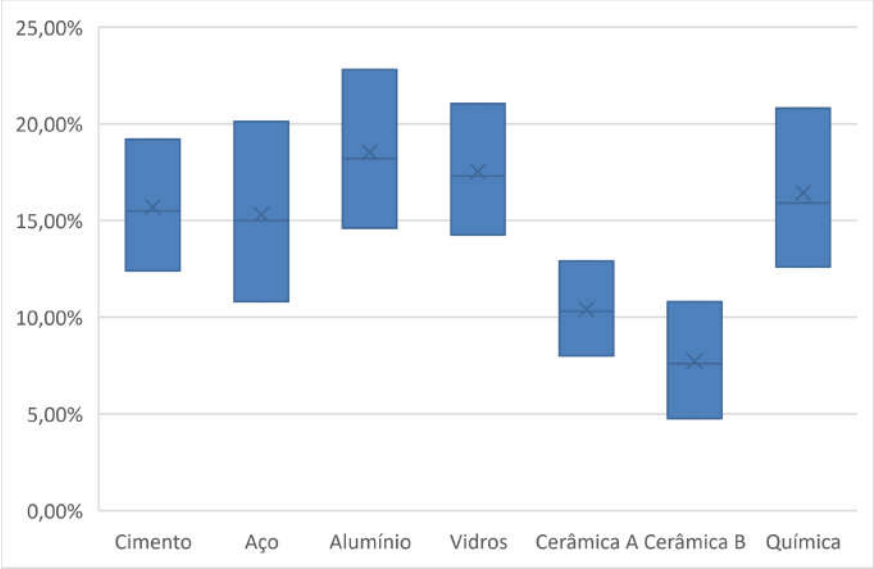


Figura 94 - Taxas de Retorno calculadas pára cada setor

Visando destacar a importância de incentivos para a superar as barreiras econômicas e de mercado dos sistemas de recuperação de calor residual no Brasil foram selecionados três dos estudos de caso, ou seja, aqueles com maior e menor taxa interna de retorno e um intermediário (Alumínio, Cerâmica e Cimento, respectivamente), e simuladas condições de financiamento, verificando-se o impacto do custo de capital nas taxas de retorno dos empreendimentos.

A Tabela 124 apresenta os resultados obtidos para estudo de caso da indústria de alumínio, considerando as mesmas premissas para o a cenário médio "Médio", exceto premissas financeiras.

Foi considerado um financiamento de 60% do valor total do investimento, com uma taxa de juros incentivada de 8% a.a. e prazo de pagamento de 10 anos. Com os resultados, verificou-se um aumento na TIR de aproximadamente pontos percentuais, melhorando consideravelmente a atratividade do investimento em relação ao modelo desalavancado.

Tabela 124 – Resultados obtidos para o estudo de caso na indústria de alumínio considerando incentivos financeiros

Indústria / Aplicação	Alumínio	
Fonte Quente	Kiln e Sidewells	
Capacidade da Unidade	600	kt/ano
Potência Instalada ORC	1,93	MW
Preço de Venda da Eletricidade	0,09	US$/kWh
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	0,09	US$/kWh
Potência Térmica na F. Quente	10,33	MW
Potência Térmica para ORC	8,78	MW
Geração de Energia	14.801,54	MW
Investimento		
Custo do ORC e Auxiliares	4,38	Milhões US$
Outros Custos	1,45	Milhões US$
Custo Total (+10% contingências)	6,41	Milhões US$
Premissas Financeiras		
Taxa de Amortização	0%	
Taxa do Empréstimo	8%	
Percentual de Empréstimo	60%	
Amortização (anos)	10	
Custo de Oportunidade	15%	
Resulados		
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)	25,24%	
Valor Presente Líquido (20 Anos)	1.742.337	US$
Payback (Anos)	5	
Custo Específico do Projeto	3321,71	US$/kW
Custo Médio da Energia Gerada	31,097	US$/MWh

O caso da cerâmica, que apresentou as menores taxas de retorno, foi alavancado conforme as condições de financiamente mencionadas anteriormente, isto é, 60% do valor do projeto a 8% a.a. com 10 anos de prazo. Os resultados são apresentados na Tabela 125.

Tabela 125 - Resultados obtidos para o estudo de caso na indústria de Cerâmica considerando incentivos financeiros

Indústria / Aplicação	Cerâmica	
Fonte Quente	Forno de Tijolos	
Capacidade da Unidade	-	
Potência Instalada ORC	0,32	MW
Preço de Venda da Eletricidade	0,09	US$/kWh
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	0,09	US$/kWh
Potência Térmica na F. Quente	0,00	MW
Potência Térmica para ORC	1,45	MW
Geração de Energia	2.436,70	MW
Investimento		
Custo do ORC e Auxiliares	1,26	Milhões US$
Outros Custos	0,23	Milhões US$
Custo Total (+10% contingências)	1,63	Milhões US$
Premissas Financeiras		
Taxa de Amortização	0%	
Taxa do Empréstimo	8%	
Percentual de Empréstimo	60%	
Amortização (anos)	10	
Custo de Oportunidade	15%	
Resulados		
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)	11,28%	
Valor Presente Líquido (20 Anos)	(167.584)	US$
Payback (Anos)	12	
Custo Específico do Projeto	5136,32	US$/kW
Custo Médio da Energia Gerada	44,35	US$/MWh

A taxa interna de retorno do cenário "Médio" do estudo de caso do setor de cerâmica sofre um ligeiro incremente de carga com o financiamento, saindo de 10,3% para 11,3%. Conforme já mencionado, o projeto possui uma potência instalada muito pequena e alto custo espefífico de investimento, que faz com que os retornos sejam baixos nesse caso.

Finalmente, no caso do setor de cimento os resultados indicaram uma melhora de 4 pontos percentuais, conforme a Tabela 126.

Tabela 126 - Resultados obtidos para o estudo de caso na indústria de Cimento considerando incentivos financeiros

Indústria / Aplicação	Cimento	
Fonte Quente	Kiln e Resfriamento do Clínquer	
Capacidade da Unidade	1.000	t/year
Potência Instalada ORC	3,16	MW
Preço de Venda da Eletricidade	0,09	US$/kWh
Preço de Compra da Eletricidade da Rede	0,09	US$/kWh
Potência Térmica na F. Quente	16,90	MW
Potência Térmica para ORC	14,37	MW
Geração de Energia	24.223,70	MW
Investimento		
Custo do ORC e Auxiliares	8,62	Milhões US$
Outros Custos	2,37	Milhões US$
Custo Total (+10% contingências)	12,09	Milhões US$
Premissas Financeiras		
Taxa de Amortização	0%	
Taxa do Empréstimo	8%	
Percentual de Empréstimo	60%	
Amortização (anos)	10	
Custo de Oportunidade	15%	
Resulados		
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)	20,06%	
Valor Presente Líquido (20 Anos)	1.650.177	
Payback (Anos)	6	
Custo Específico do Projeto	3825,02	US$/kW
Custo Médio da Energia Gerada	34,380	US$/MWh

A considerável melhora na taxa de retorno do empreendimento na indústria de cimento é ainda mais relevante devido ao grande potencial de aplicação da tecnologia nesse segmento industrial.

Dessa forma, conclui-se qualitativamente a grande importância da criação de linhas de crédito para incentivar a adoção de tecnologias de recuperação de calor de processo na indústria brasileira para produção de eletricidade. Taxas de retorno atrativas foram verificadas com o auxílio de uma linha de financiamente com juros subsidiados (8% a.a.) nos estudos de casa dos setores de alumínio e cimento, fazendo com que esses sistemas ganhem destaques dentro do conjunto de investimentos analisados pelos tomadores de decisão das empresas.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Tendo em vista que os setores industrias da economia são responsáveis por volumes siginificativos de emissões da GEEs devido a seus processos altamente energo-intensivos e estão sujeitos à grande concorrência interna e externa, é fundamental garantir a maximização da eficiência no uso da energia nos parques industriais, aumentando, assim, a sustentabilidade e a competitividade das unidades fabris. Consequentemente, verifica-se um avanço siginificativo em diversas tecnologias capazes de promover o incremento da eficiência energética industrial e redução das emissões nos processos produtivos.

Devido à característica energo-intensiva dos processos de produção industrial, dentro do diversificado leque de opções tecnológicas de eficiência energética na indústria, as tecnologias de recuperação de calor residual de processo se apresentam como soluções relevantes para a redução do consumo específico de energia (energia consumida / produto). Nesse enfoque, o uso da energia de fontes consideradas "não-nobres" pode ajudar no o aumento da "energia útil" dos processos industriais.

Nessa linha, o calor de rejeito de processos industriais pode ser utilizado como uma fonte de energia para aquecimento ou resfriamento (nesse caso através uso de *chillers* por absorção) caso exista demanda para tal. Entretanto, o uso final de energia térmica demanda que as unidades consumidoras estejam próximas da fonte, fazendo com que a localização (e existência) dessa demanda seja um fator crucial para sua sua adoção.

Dessa forma, a conversão de calor de rejeito em eletricidade se apresenta como uma solução adequada para a recuperação de calor residual quando a utilização da energia térmica é inviável ou não tem aplicação específica no processo. Além disso, a seleção da tecnologia correta para a conversão de calor em eletricidade irá demandar um estudo criterioso visando o incremento dos ganhos da oportunidade.

A recuperação de calor com fontes quentes que apresentam temperaturas superiores a 500ºC e em quantidades que possibilitem o uso de unidades geração de maior porte (acima de 5 MW) pode ser realizada através de sistemas Rankine convencionais a vapor. Entretanto, o grande desafio se encontra quando a qualidade e a temperatura da fonte quente não são adequadas para os "ciclos convencionais", onde a solução de ciclos a vapor começa a apresentar baixas eficiências de conversão e custos de manutenção muito

elevados. Ademais, o custo de instalação por kW de uma turbina a vapor tende a aumentar consideravelmente em unidades de pequeno porte, indicando que a solução para a recuperação de calor de qualidade inferior não está associada a essa tecnologia.

A adoção de ciclos Rankine orgânicos, capazes de operar com altas eficiências de conversão mesmo com fontes de temperatura muito baixas e otimizados para operação em unidades de pequeno porte constitui uma solução interessante para o aproveitamento do potencial térmico de menor qualidade, quando não existe demanda por calor nas proximidades.

Um gás de exaustão de 300ºC produzindo 1 MW de potência elétrica através de um sistema a vapor demandaria cerca de 25 kg de vapor por kW gerado, enquanto um sistema ORC demandaria menos de 4 kg por kW gerado. Tal fato acarreta diretamente na redução de tamanho e de custo das unidades gerados com fluidos orgânicos. Assim, as unidades de geração baseadas em fluidos orgânicos se mostram como a opção mais atrativa para geração de eletricidade a partir de fontes de calor de baixa qualidade. Portanto, os sistemas ORC apresentam grande potencial para a recuperação de energia e produção de eletricidade nos setores industriais energo-intensivos.

O Brasil possui um parque industrial diversificado e de porte significativo, possuindo uma atividade econômica industrial relevante, onde há diversas oportunidades para a adoção de recuperação de calor residual via ORCs que abre uma janela para o incremento da eficiência energética no setor. Entretanto, até o momento, nenhum sistema ORC para produção de eletricidade a partir de calor residual de processos industriais foi instalado no Brasil.

Dessa maneira, o estudo desenvolvido nessa tese teve como objetivo fundamental a verificação do potencial técnico e econômico da adoção de sistemas ORC na indústria brasileira, visando apresentar pela primeira vez resultados quantitativos dessa aplicação no parque industrial nacional. Partiu-se então da hipótese de que o setor industrial brasileiro apresenta um potencial significativo para a adoção de ORCs, assim, buscou-se verificar tal potencial a partir da análise de seis estudos de caso em unidades fabris reais, apresentado estudos de viabilidade técnica e econômica dos empreendimentos analisados.

Foram analisados os setores industriais com histórico internacional de aplicações de sistemas de recuperação de calor via ORC, são eles: Cimento, Ferro-Gusa e Aço, Vidros e Alumínio, além dos setores Químico e Cerâmica. No caso da Química, cabe ressaltar que a grande diversidade de processos dificultou a análise desse setor de uma forma mais abrangente. O setor de cerâmica, apesar de contar com unidades industriais de pequeno porte é também caraterizado pelo uso de lenha como combustível em formos podendo apresentar disponibilidade de madeira na fábrica, o que permitiria a adoção de uma configuração que utiliza calor de processo e combustão de biomassa.

Em termos da análise exergética dos sistemas de recuperação de calor residual foi analisada a variação da eficiência exergética em função da variação de pressão na bomba do sistema ORC, da vazão do fluido de trabalho e do próprio fluido de trabalho utilizado. Os resultados indicaram que dentre os fluidos analisados, o ciclopentano era aquele responsável por apresentar os menores níveis de irreversibilidade no ciclo de potência.

Foram calculadas as destruições exergéticas em todos os equipamentos do ORC, onde o evaporador merece destaque devido à possibilidade de se avaliar os níveis de degradação nas condições da fonte quente do ciclo de potência. O setor siderúrgico apresentou o menor percentual de destruição exergética no "Evaporador", uma vez que os níveis de vazão médios considerados na fonte quente do ORC para a siderurgia são elevados, o que acarreta na possibilidade de que, nesse caso, a fonte quente ainda estaria apta para outros usos, dispondo de calor com temperatura "útil". Porém, é crucial destacar que a grande oscilação das condições operativas do EAF é um grande complicador para a melhor utilização da energia disponível nessa fonte.

Os resultados financeiros mostraram um custo médio de cerca de 3.560 US$/kW instalado, com um custo de geração médio de 33,19 US$/MWh gerado, para os casos de recuperação de calor residual (quando desconsiderado o setor de cerâmica).

A viabilidade econômica dos empreendimentos pôde ser observada através das taxas internas de retorno calculadas, onde os casos de recuperação de calor residual puro apresentaram entre 10,3% (Cerâmica – Caso A) e 18,2% (Alumínio), enquanto os tempos de payback são da ordem de 6 a 9 anos.

O caso da siderurgia, apresenta dificuldades técnicas maiores na recuperação de calor dos EAFs, o que resulta num fator de capacidade do sistema inferior aos demais casos. Já

a indústria de alumínio apresentou resultados levemente superiores aos demais devido à algumas otimizações de projeto possíveis na fábrica, que reduziram o custo específico de investimento. O resumo dos resultados obtidos é mostrado na Tabela 127.

Tabela 127 – Resultados Obtidos nos Estudos de Caso

Parâmetro	Unidade	Cimento	Aço	Alumínio	Vidros	Cerâmica A	Cerâmica B	Química
Capacidade da Unidade	10^3 t/ano	803	1020	600	876	-	-	75
Potência Instalada ORC	MW	3,16	3,29	1,93	3,42	0,32	2,47	2,49
Preço de Venda da Eletricidade	US$/kWh	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Geração de Energia	MWh/ano	24224	22338	14802	26230	2437	18937	19064
Custo de Investimento	Milhão de US$	12,08	11,34	6,41	11,87	1,63	10,29	9,28
Taxa Interna de Retorno (20 Anos)	%	15,5%	15,0%	18,2%	17,3%	10,3%	7,6%	15,9%
Valor Presente Líquido (20 Anos)	US$	267.906	102.269	1.008.859	1.350.658	-354.297	-3.410.459	417.387
Payback	Anos	7	7	6	6	9	11	6
Custo Específico do Projeto	US$/kW	3825	3446	3322	3469	5136	4167	3729,52
Custo Médio da Energia Gerada	US$/MWh	34,38	34,64	31,1	32,05	44,35	327,72	33,76
Energia por por tonelada de Produto	MWh/kt ano	30,17	21,90	24,67	29,94	-	-	254,18
Potência por tonelada de Produto	kW/kt ano	3,94	3,23	3,22	3,90	-	-	33,16
Emissões Evitadas	tCO_2/ano	2180	2010	1332	2361	219	1704	1716
Custo de Abatimento	US$/$tCO_2$	-6,14	-2,54	-37,87	-28,61	80,77	100,05	-12,16

Para o setor cerâmico os números divergiram dos demais subsetores devido à menor potência instalada, e consequentemente menores ganhos de escala. O estudo de Caso Cerâmica – Caso A apresentou custos específicos de 5.136 USD/kW, com um custo médio da eletricidade resultando em 44,35 R$/MWh, enquanto a geração híbrida com biomassa (Cerâmica – Caso B) apresentou um custo específico de investimento de 4.167 USD/kW e custo da eletricidade média gerada de 327,72 R$/MWh, valor este consideravelmente mais alto que os demais devido à necessidade de aquisição de combustível.

Deve-se ressaltar a grande dependencia dos resultados econômicos em função do preço médio da eletricidade. Logo, realizou-se uma análise de sensibilidade para os estudos de caso verificando o efeito da variação desse parâmetro. Em situaçãoes de baixo preço da eletricidade, inferiores a 225 R$/MWh os empreendimentos apresentam taxas de retorno entre 5.8% e 12%, enquanto no caso onde o preço da eletricidade atinge patamares superiores a 350 R$/MWh, todos os empreendimentos resultam em TIRs superiores a 25% (exceto o caso da cerâmica com 18%).

Em termos das emissões de GEEs, obviamente, verifica-se uma redução diretamente proporcional à energia gerada pelo sistema, uma vez que a eletricidade gerada é descontada do consumo de energia elétrica da fábrica provinente do sistema elétrico brasileiro. Os custos marginais de abatimento de cada projeto foram calculados, sendo observado que para todos para a ampla maioria dos cados os resultados são negativos, entre, indicando que os projetos tendem a ser uma medida de baixo carbono atrativa em mercados de carbono.

Posteriormente, a verificação do potencial de recuperação de calor via ORC nos subsetores industriais foi feita a partir da extrapolação dos resultados obtidos nos estudos de caso. A única exceção foi o setor químico, onde o estudo de caso apresentado é desenvolvido para uma unidade produtora de negro-de-fumo, produto químico pouco representativo dentro do país. E, de maneira a permitir o cálculo de maiores potenciais no setor, fez-se uso de informações da literatura referentes à disponibilidade de calor na "Produção de Eteno", sendo esse o processo produtivo adotado para a extrapolação na química, devido à sua maior relevância no país. Nota-se aqui que a qualidade do calor residual da planta de negro-de-fumo é compatível com a de eteno. Percebe-se ainda que a produção de eteno representa o principal produto em base mássica da indústria química brasileira. Não obstante, seria relevante em estudos futuros tanto avaliar um caso real de planta de eteno no Brasil (o que dependeria de acesso a esta planta) quanto para outras plantas de processo químico, diante da diversidade da indústria química brasileira.

Ademais, o subsetor de Cerâmica não foi considerado nessa análise devido aos resultados econômicos pouco atrativos, como verificado nos estudos de caso, e por conta das características dos fornos, que em geral apresentam volumes de rejeito térmico significativamente inferiores quando comparados aos demais setores analisados.

Quando da extrapolação dos estudos de caso para os setores avaliados, os resultados mostraram um potencial total de cerca de 490 MW, onde o setor de Cimento merece destaque devido ao maior percentual de participação, representando 75% do total. A produção de eteno (do segmento químico) representa com 13% e a siderurgia 10%. O setor de vidros, apesar dos bons resultados do estudo de caso, não apresenta uma grande capacidade instalada no Brasil, resultando em um pequeno potencial de geração, de cerca de 2% do total calculado. O setor de alumínio apresentou os menores resultados com apenas 0,4% do potencial nacional, devido a estar restrito apenas à reciclagem de alumínio, não englobando a produção de alumínio primário. Seguidamente, calculou-se a redução de emissões de GEEs, que resultou em 335 mil toneladas CO_2 anuais.

Devem ser destacados alguns elementos fundamentais nessa análise transversal da indústria referentes à não exaustão de todo o potencial dos subsetores industriais analisados. Por exemplo, o setor de vidros foi analisado apenas em relação à produção de vidros planos; de forma semelhante o setor de alumínio levou em conta apenas a reciclagem; a química apenas a produção de eteno; enquanto a siderurgia levou em conta a recuperação em de calor em EAFs e nos fornos de reaquecimento de tarugo. O subsetor de cimento foi o único completamente verificado devido à uniformidade de seu processo produtivo na rota de via seca no país. Consequentemente, esse fato contribuiu para que os maiores potenciais estejam concentrados neste setor.

Em seguida, estimou-se que o investimento necessário atingir esse potencial através da implementação de ORCs nos setores analisados é de cerca de 1,84 US$ bilhão. E, conforme verificado nos resultados dos modelos econômicos, tais projetos são soluções muito capital intensivas que apresentam tempos de *payback* relativamente longos.

Assim, apesar dos projetos de WHTP via ORC apresentarem viabilidade técnica e econômica, as aplicações de tais sistemas no Brasil ainda enfrentam um conjunto de barreiras para sua aplicação, principalmente em relação ao acesso ao capital para investimento, fazendo que esse potencial se mantenha inexplorado. Verificou-se através de simulações que a criação de linhas de crédito subsidiadas capaz de alavancar o empreendimento são capazes de aumentar drasticamente a atratividade do projeto, contribuindo para a superação da barreira econômica evidenciada hoje no país para esse tipo de solução.

Finalmente, observou-se a validação da hipótese de que a adoção de ORCs no setor industrial brasileiro possui potencial de cerca de 492 MW. Tal valor se encontra abaixo dos patamares observados nos resultados para o mercado indiano (758 MW – nos setores de Cimento, Ferro e Aço e Vidro) e europeu (1.400 MW – nos setores de Cimento, Ferro e Aço e Vidro), porém deve-se ressaltar a menor capacidade de produção industrial brasileira quando comparada com tais mercados.

Com relação aos resultados econômicos, verificou-se que a viabilidade econômica dos estudos de caso é positiva, indicando que essa medida de eficiência energética industrial tem benefícios reais no que se trata de economia de recursos e aumento da competitividade das unidades fabris. Além disso, por se tratar de uma forma de produção de eletricidade livre de emissões de GEEs, o uso de ORCs para recuperação de calor resulta em custos marginais de abatimento negativos, sendo medida "non-regret" para o abatimento de emissões na indústria.

Dessa maneira, por conta da comprovação do potencial existente, combinado com a viabilidade técnico-econômica dos projetos, deve-se dar ênfase a essa medida de eficiência energética num contexto mundial onde a mitigação de emissões e redução da intensidade energética da indústria são fundamentais.

Em trabalho futuros, faz-se necessário avaliar a aplicação dos ORCs nos demais segmentos industriais brasileiros, principalmente a adoção dos sistemas para fechamento de ciclos em turbinas a gás em estações de compressão de gás, devido à sua relevância observada em estudos internacionais.

Além disso, ao analisar o conjunto de aplicações de ORCs no mundo, evidencia-se o potencial do uso de tais sistemas utilizando biomassa residual como combustível. Os altos níveis de eficiência de ORCs, mesmo em unidades de pequeno porte, faz com que a geração descentralizada de energia utilizando biomassa tenha um grande diferencial associado à redução dos custos de transporte do combustível. Uma vez que ganhos nos custos logísticos do combustível poderiam ser atingidos quando utilizadas diversas unidades geradoras próximas das fontes de biomassa, em detrimento de uma única unidade geradora no centro das fontes de biomassa.

Sendo o Brasil um país com grande diversidade e volume de biomassa residual em diversas regiões, estima-se um potencial significativo para essa aplicação, indicando assim outro tema relevante para estudos futuros.

Ademais, a proposta de estudos de caso em plantas reais, com diagnósticos energéticos e balanços de 1ª e 2ª lei: é tanto uma vantagem da metodologia adotada neste estudo, quanto um desafio porque implica em acesso a unidades fabris reais. Eventualmente, um programa de eficiência energética industrial poderia criar a opção de diagnósticos energéticos, que seriam insumo para uma possível implementação da tecnologia aqui estudada. Mas, para tanto, o diagnóstico deve ´prover informações em nível das propriedades intensivas e extensivas dos resíduos térmicos dos processos.

Portanto, constatou-se que as características técnicas dos ciclos Rankine orgânicos se convertem em diferentes aplicações e usos no país, sendo fundamental pavimentar o caminho para sua utilização em território nacional, através de pesquisas acadêmicas como esta tese, divulgação da tecnologia no meio industrial e desenvolvimento de projetos piloto para demonstração desta alternativa.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Seminário CNI-ABRACE. EnergiaElétrica:** Fator de Competitividade da Indústria. 2011.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio, 2017. Disponivel em: <http://abal.org.br/>.

ABAL. **Estatísticas da Associação Brasileira do Alumínio**. 2017.

ABIQUIM. Anuário Estatístico: Química Brasileira, 2015.

ALVES, M. S. et al. Economical Evaluation of 1 MWel Organic Rankine Cycle Using Eucalyptus Wood from Energy Forests in Brazil. **WREF**, 2012.

ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 12 Julho 2017. Disponivel em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse.cfm?Classe=Biomassa>.

ANGELINO, G.; MORONI, V. Perspectives for Waste Heat Recovery by Means of Organic Fluid Cycles, v. 95 (2), p. 75 - 83, Abril 1973. ISSN doi:10.1115/1.3445701.

ANICER. **Anuário - Associação Nacional das Indústrias de Cerâmica**. 2012.

ARACHCHIGE, U. S. P. R. et al. Impact of kiln thermal energy demand and false air on cement kiln flue gas CO2 capture. **International Journal of Energy and Environment**, 2014.

BADR, O.; PROBERT, S. D.; O'CALLAGHAN, P. W. Selecting a working fluid for a Rankine Cycle Engine. **Applied Energy**, 1985.

BARBER, R. E. **Solar Rankine Engines - Examples and Projected Costs**. Gas Turbine Conference and Exhibid and Solar Energy Conference. San Diego: ASME. 1979.

BARRERA, J. E. exergy Analysis and Strategies for Waste Heat Recovery in Offshore Platforms. **22nd International Congress of Mechanical Engineering**, 2013.

BEERKENS, R. G. C. **Deposits and condensation from flue gases in glass furnaces**. 1986.

BEJAN, A. Fudamentals of Exergy Analysis, Entropy Generation Minimization, and generation flow architecture. **International Journal of Exergy Research**, 2002.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design Optimization**. Nova York: Wiley, 1996.

BENDING, M.; MAREÇHAL, F.; FAVRAT, D. Defning the Potential of Usable Waste Heat in Industrial Processes with the Help of Pinch and Exergy Analysi. **Chemical Engineering Transactions**, 2012.

BERGH, C. **Energy Efficiency in the South African crude oil refining industry: Drivers, barriers and opportunities**. Cape Town. 2012. (http://www.crses.sun.ac.za/files/research/completed-research/other/thesis_bergh_energyefficiency.pdf).

BIANCHI, M.; DE PASCALE, A. Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat source. **Applied Energy**, 2011.

BNDES. Fundo Clima, Junho 2016. Disponivel em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/financiamentos>.

BNDES. PANORAMAS SETORIAIS - Mudanças Climáticas: Química, 2016.

BREF. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries**. 2014.

BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy**. 2011.

BRUNO, J. et al. Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 2212-2226, 2008. ISSN https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.022.

BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. **Waste Heat Recovery**. 2010.

CALM, J. M.; HOURAHAN, G. C. Refrigerant Data Update. **Heating / Piping / Air conditioning Engineering**, 2007.

CASCI, C. Heat Recovery in a Cement Kiln with an Organic Rankine Cycle Engine. **Heat Recovery Systems**, Volume 1 1981. 125 - 131.

CASCI, C. et al. Heat Recovery in a Ceramic Kiln with an Organic Rankine Cycle Engine. **Heat Recovery Systems**, 1981.

CHEEK, R. M.; LACEY, P. D. **600kW Organic Rankine Cycle Waste Heat Power Conversion System**. 12th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1977. p. 1095 - 1099.

CHEN, C. L.; LI, P. Y.; LE, S. N. T. Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery in a Refinery. **Industrial and Engineering Chemical Research**, 2016.

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**, 2010.

CNI. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria**. Brasília. 2010.

CNI. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria - Vidro**. Brasília. 2010.

CNI. **A Indústria do Aço no Brasil - Encontro da Insdústria para a Sustentabilidade**. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2012.

CNQ. **Panorama Setor de Vidro**. 2015.

COMERC. **Comerc Energia**, 22 Agosto 2017. Disponivel em: <http://www.comerc.com.br/comerc/default.asp>.

CSI. **Cement Sustainability Initiative**. 2013.

DAVID, G.; F. MICHEL, F.; SANCHEZ, L. Waste heat recovery projects using Organic Rankine Cycle technology – Examples of biogas engines and teel mills applications. **World engineers' convention**, 2011.

DECC. **Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmaps to 2050 - Appendices**. 2015.

DECLAYE, S. **Design, optimization and modeling of an organic Rankine cycle for waste heat recovery**. Liège: University of Liege - Aerospace and Mechanical Engineering Department, 2009.

DINCER, I. Thermodynamics, exergy and enviromental impact. **Eleventh International Symposium on Transport Phenomena,** Hsinchu, 1998.

DOE. **Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery**. Pacific Northwest National Laboratory. 2006.

DOE. **Waste heat recovery:** technology and opportunities in US industry. 2008.

DRESCHER, U.; BRUGGEMANN, D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. **Applied Thermal Engineering**, 2007.

DUFFY, D. P. Better Cogeneration through Chemistry: The Organic Rankine Cycle. **Distributedenergy.com**, Novembro 2005.

EIA. **Annual Energy Review**. 2006.

EIA. **Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants**. US Department of Energy. Washington. 2013.

ENERGETICS. Energy and Environmental Profile of the US Chemical Industry, 2000.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2013 - Relatório Final**. Rio de Janeiro. 2013.

EPE. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2016.

EPE. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro. 2017.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a Indústria no Brasil**. Rio de Janeiro. 2011.

FORNI, D. et al. Heat recovery for electricity generation in Industry. **ECEEE Summer Industrial Study**, 2012.

FORNI, D.; CAMPANA, F.; DI SANTO, D. Innovative system for electricity generation from waste heat recovery. **ECEEE INDUSTRIAL SUMMER STUDY PROCEEDINGS**, 2014.

FOUNDRYBENCH PROJECT. Good Practice Guide on energy saving potentials and opportunities for foundries, 2011.

GANAPATHY, V. **Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

GIGLIOLI, G. **Tetra-Chloroethylene Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from Ceramic Tunnel Kilns**. 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1978. p. 1488 - 1493.

HENRIQUES JR., M. F. Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro. **Tese de Doutorado - COPPE**, 2010.

HENRIQUES JR., M. F. **Potencial de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa pelo Uso de Energia no Setor Industrial Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2010.

HNAT, J. G. et al. Industrial Heat Revovery with Organic Rankine Cycles. **Proceedings from the Fourth Industrial Energy Technology Conference**, Abril 1982.

H-REII. Heat Recovery in Energy Intensive Industries, 2012. Disponivel em: <http://www.hreii.eu>.

HREII. **ORC Waste Heat recovery in energy intensive industries**. 2013.

HUNG, T. C. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. **Energy Conversion and Management**, 2001.

IEA. **Energy technology transitions for industry**. 2009.

IFC. **Waste Heat to Power Market Assessment**. 2015.

IGEF. **Market Potential Study for ORC Technology in India**. 2017.

IIP. Waste Heat Recovery for the Cement Sector - Market and Supplier Analysis, 2014.

IIP. **Industrial Efficiency Technology Database**, 2016. Disponivel em: <http://ietd.iipnetwork.org/>.

INCOBIO. Dados Técnicos - Cavaco. **Incobio - Referência em Biomassa**, 2017. Disponivel em: <http://incobio.com.br>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro. 2013.

INT. **Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil**. Rio de Janeiro. 2012.

JING, L.; GANG, P.; JIE, L. Optimization of low temperature solar thermal electric generation with Organic Rankine Cycle in different areas. **Applied Energy**, 2010.

JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA. **DIRECTIVA 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**. União Europeia. 2006.

JRC. est Available Techniques Reference Document for the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, 2010.

KALTSCHMITT, M.; STREICHER, W.; WIESE, A. **Renewable Energy:** Technology, Economics and Environment. Springer, 2007.

KARELLAS, S. E. A. Energetic and Exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry. **Proceedings of ECOS**, 2012.

KONTOLEONTOS, E. et al. Optimized geothermal binary power cycles. **JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS**, v. 10, p. 1228-1232, 2010.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Butterworths, 1985.

LARJOLA, J. Electricity from industrial waste heat using high-speed organic Rankine cycle. **International Journal of Production Economics**, 1995.

LAZIC, L.; VARGA, A.; KIZEK, J. Analysis of combustion characteristics in a aluminium melting furnace. **Metalurgija**, 2005.

LEE, M. J.; TIEN, D. L.; SHAO, C. T. Thermophysical capability of ozone-safe working fluids for an organic Rankine cycle system. **Heat Recovery Sysems and CHP**, 1993.

LONG, R. et al. Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery. **Energy**, 2014.

LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009. 777 - 788.

LUJAN, J. M. et al. Model of the expansion process for R245fa in an Organic Rankine Cycle. **Applied Thermal Engineering**, 2011.

LUKAWSKI, M. **Design and Optimization of Standardized Organic Rankine Cycle Power Plant for European Conditions**. Akureyri: University of Akureyri, 2009.

MAGO, P. J. et al. An examination of regenerative organic Rankine cycle using dry fluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 998-1007, 2007.

MAIZZA, V.; MAIZZA, A. Working fluids in non-steady flows for waste energy recovery systems. **Applied Thermal Engineering**, 1996.

MALMSTROM, S. **Efficient use of Waste Energy in the Steel Industry**. Lulea: MSc Programmes in Engineering, 2009.

MCTI. Fator Médio Mensal, 2017. Disponivel em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>. Acesso em: 22 Junho 2017.

MCTIC. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2016.

MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não-metálicos**. Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2012.

MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não-metálicos**. Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2016.

MME. **Anuário estatístico do setor metalurgico e do setor de transformacao de não metalicos.** Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponivel em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-

mineral/publicacoes/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos>. Acesso em: 17 Junho 2017.

NGUYEN, T. V. et al. Oil and gas platforms with steam bottoming cycles: System integration and thermoenvironomic evaluation. **Applied Energy**, 2014.

NORD, L. O.; BOLLAND, O. Steam bottoming cycles offshore – challenges and possibilities. **J Power Technol** , 2013.

NOWICKI, C.; GOSSELIN, L. An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminum Industry. **Journal of the Minerals, Metals & Materials Society**, 2012.

OBEMBERGER, I. . T. P.; REISENHOFER, E. Description and evaluation of the new 1000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated with biomass CHP plant in Lienz, AUstria. **Euro heat and power**, 2002.

OBEMBERGER, I.; HAMMERSCHMID, A. **Biomass fired CGP plant based on an ORC cycle - Final Report**. 2001.

ORC World Maps. **ORC Market:** A World Overview, 2016. Disponivel em: <http://orc-world-map.org/analysis.html>. Acesso em: Agosto 2016.

ORMAT. ORMAT Solutions, 22 Junho 2015. Disponivel em: <http://www.ormat.com/solutions>. Acesso em: 2015.

OSCHATZ. Plant construction and waste heat systems for the chemical industry, 2016.

PERIS, B. et al. Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. **Energy**, 2015.

POLITECNICO DI MILANO. **Energy Efficiency Report - Energy Strategy**. Milão. 2012.

PRATT & WHITNEY POWER SYSTEMS ORC SOLUTIONS. **Organic Rankine Cycle: Waste Heat Power Generation**. 2015.

PRIDASAWAS, M.; LUNDQVIST, P. An exergy analysis of solar-driven ejector refrigeration system. **Solar Energy**, 2006.

PWC. Indústria Química no Brasil - Um panorama do setor, 2013.

QUANTITECH. Ethylene Production, 2017. Disponivel em: <http://www.quantitech.co.uk/entity-292-Ethylene-Production.aspx>. Acesso em: 13 Julho 2017.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013.

QUOILIN, S.; LEMORT, V. Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems. **5th European conference economics and management of energy in industry**, 2009.

QUOLIN, S. . D. S. et al. Working fluid selection and operating maps for Organic Rankine Cycle expansion machines. **International Compressor Engineering Conference at Purdue**, Julho 2012.

RANT, Z. Exergy, a new world for "technical available work". **Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens**, 1956.

ROCHEDO, P. R. **Análise Econômica sob Incerteza da Captura de Carbono em Termoelétricas a Carvão: Retrofitting e Capture-Ready**. Rio de Janeiro. 2011.

ROSEN, M. A. **Exergy Analysis of Waste Emissions**. Ontario, Canada: Institute of Technology Oshawa, 1999.

ROWSHANZADEH, R. **Performance and Cost Evaluation of Organic Rankine Cycle at Different Technologies**. KTH, Suécia: Department of Energy Technology, 2010.

SAWYER, R. H.; ICHIKAWA, S. **The Organic Rankine Cycle Steam, Its Application to Extract Energy from Low Temperature Waste Heat**. 2nd Annual Conference on Energy Conservation and Technology. Houston. 1980.

SCHAEFFER, R.; WIRTHSHAFTER, R. M. An Exergy Analysis of the Brazilian Economy: From Energy production to Final Energy Use, v. 17, p. 841-855, 1992.

SCHWOB, M. R. V. **Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil**. Rio de Janeiro. 2012.

SCHWOB, M. R. V.; HENRIQUES, M. F.; SZKLO, A. S. Technical potential for developing natural gas use in the Brazilian red ceramic industry. **Applied Energy**, 2009.

SINDIFER. **Aunário**. Belo Horizonte. 2009.

SINDIFER. **Anuário**. Belo Horizonte. 2016.

SNIC. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro. 2015.

SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M. T. Energy efficiency and reduction of Co2 emissions through 2015: The Brazilian cement industry. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 2000.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power cycles for electricicty generation, Power from the sun**. 2001.

SZARGUT, J. Exergy Analysis of Thermal Processes and Systems with Ecological Application. **Theory and Practices for Energy Education, Training, Regulation and Standarts**, Silesia, 1993.

SZKLO, A. S.; SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M. T. Economic potential of natural gas-fired cogeneration--analysis of Brazil's chemical industry, v. 32, p. 1415-1428, 2004.

TANGRAM TECHNOLOGY. Energy efficiency in ceramics processing, 2010.

TCHANCHE, B. F. . Q. S. . D. S.; PAPADAKIS, G.; LEMORT, V. Economic Feasibility Study of a Small Scale Organic Rankine Cycle in Waste Heat Recovery Application. **ASME**, 2010.

TCHANCHE, B. F. **Low-Grade Heat Conversion into Power using Small Scale Organic Rankine Cycle**. Atenas: Agricultural Univesity of Athens, 2010.

TCHANCHE, B. F. et al. Optimal evaporating temperature for working fluids in Rankine heat engines. **Proc. of International Exergy, Energy and Environmental Symposium**, 2009.

TCHANCHE, B. F. et al. Low-grade heat conversion into power using organic rankine cycles - A review of various applications. **Reneawable Energy**, 2010.

TERMOSERVICE. Empresa de Serviços. 2013.

THEKDI, A. et al. **Preliminary Results from Electric Arc Furnace Off-Gas Enthalpy Modeling**. The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Cleveland, OH, USA. 2015.

TRADENER, 4 Outubro 2017. Disponivel em: <http://www.tradener.com.br/>.

TURBODEN. Turboden. **Clean Energy Ahead**, Outubro 2013. Disponivel em: <http://www.turboden.eu/en/downloads/downloads.php>.

TURBODEN. **EAF Project**. 2014.

TURBODEN. Organic Rankine Cycle Waste Heat Power Generation, 2014.

TURBODEN. The Organic Option. **International Cement Review**, Setembro 2015.

TURBODEN. Turboden - Clean Energy Ahead, 2015. Disponivel em: <http://www.turboden.eu/en/downloads/downloads.php?categoria=presentations>.

TURBODEN. Turboden. **Clean Energy Ahead**, Julho 2017. Disponivel em: <www.turboden.eu>.

UBIETO, E. **Energy System Analysis in the Swedish - Iron and Steel Industry**. Luleå University of Technology, 2012.

UNIDO. **Barriers to industrial energy efficiency: A literature review**. Vienna. 2011.

UNIDO. **Energy Efficiency Technologies and Benefits**. 2013.

USG. U.S.Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries**, 2017. Disponivel em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.

VESCOVO, R. ORC recovering industrial heat: power generation from waste energy streams. **Cogeneration & On-Site Power Production**, Brescia, 01 Março 2009.

VOTORANTIM. **Fluxograma de Processos do EAF**. Resende. 2014.

WALI, E. Working fluids for solar Rankine-cyle coocling systems. **Energy**, 1980.

WALNUM, H. T. et al. Modelling and simulation of CO2 (carbon dioxide) bottoming cycles for offshore oil and gas installations at design and off-design conditions. **Energy**, 2013. 513–520.

WANG, X. D.; ZHAO, L. Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation. **Solar Energy**, v. 83, p. 605-613, 2008.

WANG, Z.; ZHOU, N.; JING, G. Performance analysis of ORC power generation system with low-temperature waste heat of aluminum reduction cell. **Physics Procedia**, 2012.

WENG, R.; BORY, D.; BERTHOU, M. A Method to Evaluate the Waste Heat Recovery Potential Across the Industrial Sectors. **ECOS**, 2013.

WORD STEEL ASSOCIATION. **Steel's Contribution to a Low Carbon Future**. 2014.

WORLD BANK. **Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier analysis**. 2014.

WORLD BANK. IEA Statistics © OECD/IEA 2014. **Fossil fuel energy consumption (% of total)**, Julho 22 2017.

WS ENGENHARIA AMBIENTAL. **Relatório de Amostragens de Fonte Fixa de Emissões Atmosféricas**. Rio de Janeiro. 2012.

APÊNDICE I – Exemplos de Aplicações de ORC

Essa secção do apêndice trata do detalhamento das diversas aplicações de ciclos Rankine orgânico (ORCs) em diferentes países. São destacados aqui as aplicações de recuperação de calor mais relevantes para o estudo, bem como aplicações geotérmicas, de biomassa e termosolares.

Indústria de Fero-Gusa e Aço 1:

Local: Singapura - NatSteel

Fonte de Calor: Gás de exaustão do forno de preaquecimento da laminação (queima de óleo combustível leve) a 400°C

Potência Elétrica Gerada: 0,7 MW

Figura 95 - Unidade ORC na próxima à laminação.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Indústria de Fero-Gusa e Aço 2:

Local: Alemanha - Elbe-Stahlwerke Feralpi EAF Shop

Fonte de Calor: Forno elétrico a arco (EAF – Electric Arc Funace), a exaustão do forno foi acoplada a um gerador de vapor (26 bar e 245°C) que fornece calor ao ORC.

Potência Elétrica Gerada: 2,56 MW

Figura 96 - Unidade ORC Instalado na Fábrica.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

Indústria de Vidro:

Local: Itália – AGC Glass Cuneo

Capacidade produtiva: 600 toneladas/dia

Fonte de Calor: Exaustão do forno de vidro, temperatura de aproximadamente 500°C

Potência Elétrica Gerada: 1,3 MW

Figura 97 – Vista Aérea da Fábrica.

Fonte: (TURBODEN, 2015)

APÊNDICE II – Resultados das Análises Financeiras

Essa secção do apêndice apresenta os detalhes dos resultados das análises financeiras para as simulações "Pessimista" e "Otimista" de cada um dos Estudos de Caso efetuados no trabalho.

II.1 ***Química – Pessimista***

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
Potência Térmica da F. Quente (MWth)		11,31	11,31	11,31	11,31	11,31	11,31	11,31	11,31	11,31	11,31
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324	1.738.324
Receitas Totais		**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**	**1.738.324**
Despesas		(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)	(179.743)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
PP&E Bruto	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852	11.203.852
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**	**11.203.852**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581	1.558.581
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(11.203.852)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(11.203.852)**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**	**1.558.581**
FC Acumulado	(11.203.852)	(9.645.270)	(8.086.689)	(6.528.108)	(4.969.526)	(3.410.945)	(1.852.363)	(293.782)	1.264.800	2.823.381	4.381.962

II.2 ***Química – Otimista***

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
Potência Térmica da F. Quente (MWth)		101.945	101.945	101.945	101.945	101.945	101.945	101.945	101.945	101.945	101.945
Potência para o Grid (MW)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991	1.787.991
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**	**1.787.991**
Despesas		(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)	(222.227)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**
PP&E Bruto	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515	7.347.515
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**	**7.347.515**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763	1.565.763
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(7.347.515)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(7.347.515)**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**	**1.565.763**
FC Acumulado	(7.347.515)	(5.781.752)	(4.215.988)	(2.650.225)	(1.084.462)	481.301	2.047.064	3.612.828	5.178.591	6.744.354	8.310.117

II.3 Cimento – Otimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Potência Térmica da F. Quente (MWth)		16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900
Potência para o Grid (MW)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958	2.271.958
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**	**2.271.958**
Despesas		(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)	(174.411)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**
PP&E Bruto	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201	10.610.201
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**	**10.610.201**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547	2.097.547
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(10.610.201)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(10.610.201)**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**	**2.097.547**
FC Acumulado	(10.610.201)	(8.512.653)	(6.415.106)	(4.317.559)	(2.220.012)	(122.464)	1.975.083	4.072.630	6.170.178	8.267.725	10.365.272

II.4 Cimento – Pessimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Potência Térmica da F. Quente (MWth)		16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900	16.900
Potência para o Grid (MW)		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738	2.145.738
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**	**2.145.738**
Despesas		(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)	(282.379)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**
PP&E Bruto	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240	13.566.240
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**	**13.566.240**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359	1.863.359
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(13.566.240)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(13.566.240)**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**	**1.863.359**
FC Acumulado	(13.566.240)	(11.702.881)	(9.839.522)	(7.976.163)	(6.112.804)	(4.249.445)	(2.386.086)	(522.727)	1.340.632	3.203.991	5.067.350

II.5 Siderurgia – Otimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016	2.234.016
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**	**2.234.016**
Despesas		(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)	(171.498)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**
PP&E Bruto	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472	9.905.472
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**	**9.905.472**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518	2.062.518
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(9.905.472)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(9.905.472)**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**	**2.062.518**
FC Acumulado	(9.905.472)	(7.842.954)	(5.780.436)	(3.717.919)	(1.655.401)	407.117	2.469.635	4.532.153	6.594.671	8.657.189	10.719.707

II.6 Siderurgia – Pessimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778	1.839.778
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**	**1.839.778**
Despesas		(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)	(242.115)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**
PP&E Bruto	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594	12.769.594
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**	**12.769.594**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663	1.597.663
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(12.769.594)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(12.769.594)**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**	**1.597.663**
FC Acumulado	(12.769.594)	(11.171.931)	(9.574.268)	(7.976.605)	(6.378.942)	(4.781.279)	(3.183.616)	(1.585.953)	11.710	1.609.373	3.207.036

II.7 Alumínio – Otimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247	1.388.247
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**	**1.388.247**
Despesas		(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)	(106.571)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**
PP&E Bruto	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949	5.535.949
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**	**5.535.949**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676	1.281.676
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(5.535.949)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(5.535.949)**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**	**1.281.676**
FC Acumulado	(5.535.949)	(4.254.273)	(2.972.597)	(1.690.921)	(409.245)	872.431	2.154.107	3.435.782	4.717.458	5.999.134	7.280.810

II.8 Alumínio – Pessimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93	1,93
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122	1.311.122
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**	**1.311.122**
Despesas		(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)	(172.544)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**
PP&E Bruto	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849	7.292.849
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**	**7.292.849**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578	1.138.578
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(7.292.849)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(7.292.849)**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**	**1.138.578**
FC Acumulado	(7.292.849)	(6.154.271)	(5.015.692)	(3.877.114)	(2.738.535)	(1.599.957)	(461.378)	677.200	1.815.779	2.954.357	4.092.935

II.9 Vidros – Otimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167	2.460.167
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**	**2.460.167**
Despesas		(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)	(188.859)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**
PP&E Bruto	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964	10.559.964
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**	**10.559.964**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309	2.271.309
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(10.559.964)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(10.559.964)**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**	**2.271.309**
FC Acumulado	(10.559.964)	(8.288.655)	(6.017.347)	(3.746.038)	(1.474.729)	796.579	3.067.888	5.339.196	7.610.505	9.881.814	12.153.122

Na

II.10 Vidros – Pessimista

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Gerada (MW)		3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491	2.323.491
Venda de Energia para o Grid		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receitas Totais		**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**	**2.323.491**
Despesas		(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)	(305.771)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**
IR		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PIS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CSLL		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
COFINS		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Receita Líquida		**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**
PP&E Bruto	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975	13.179.975
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**	**13.179.975**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720	2.017.720
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(13.179.975)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(13.179.975)**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**	**2.017.720**
FC Acumulado	(13.179.975)	(11.162.254)	(9.144.534)	(7.126.814)	(5.109.094)	(3.091.374)	(1.073.654)	944.066	2.961.786	4.979.506	6.997.226

II.11 Cerâmica – Otimista Caso B

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Consumida (MW)		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Potência Térmica da F. Quente (kWth)		36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000
Potência para o Grid (MW)		2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		323.508	323.508	323.508	323.508	323.508	323.508	323.508	323.508	323.508	323.508
Venda de Energia para o Grid		1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629	1.452.629
Receitas Totais		**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**	**1.776.137**
Despesas		(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)	(539.779)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**	**1.236.358**
IR		(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)	(27.133)
PIS		(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)	(9.442)
CSLL		(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)	(15.688)
COFINS		(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)	(43.579)
Receita Líquida		**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**
PP&E Bruto	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314	9.196.314
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**	**9.196.314**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516	1.140.516
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(9.196.314)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(9.196.314)**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**	**1.140.516**
FC Acumulado	(9.196.314)	(8.055.798)	(6.915.282)	(5.774.767)	(4.634.251)	(3.493.735)	(2.353.219)	(1.212.703)	(72.187)	1.068.329	2.208.845

II.12 Cerâmica – Pessimista – Caso B

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Potência Consumida (MW)		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Potência Térmica da F. Quente (kWth)		36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000	36.000
Potência para o Grid (MW)		2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Receitas											
Redução da compra de Eletricidade		305.535	305.535	305.535	305.535	305.535	305.535	305.535	305.535	305.535	305.535
Venda de Energia para o Grid		1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928	1.371.928
Receitas Totais		**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**	**1.677.463**
Despesas		(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)	(691.557)
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBIT		**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**
Resultados Financeiros		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
EBT		**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**	**985.906**
IR		(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)	(25.519)
PIS		(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)	(8.918)
CSLL		(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)	(14.817)
COFINS		(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)	(41.158)
Receita Líquida		**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**
PP&E Bruto	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808	11.391.808
Depreciação		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PP&E Líquido		**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**	**11.391.808**
Dívida	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Dívida	–										
Amortização da Dívida		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Lucro Líquido	–	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495	895.495
D&A	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Investimento	(11.391.808)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pagamento da Dívida	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fluxo de Caixa	**(11.391.808)**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**	**895.495**
FC Acumulado	(11.391.808)	(10.496.313)	(9.600.819)	(8.705.324)	(7.809.829)	(6.914.334)	(6.018.840)	(5.123.345)	(4.227.850)	(3.332.355)	(2.436.860)

APÊNDICE III – Resultados das Análises Exergéticas

A presente seção do apêndice mostra os resultados dos cálculos termodinâmicos de Primeira e Segunda Lei para os "pontos ótimos" obtidos no processo de otimização de cada um dos fluidos analisados nos Estudos de Caso.

III.1 – Química

III.1.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser		
Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-17,53	kJ/kg
Density	725,53	kg/m³
Exergy	0,57	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump		
Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator		
Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	508,09	K
Entropy	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy	678,43	kJ/kg
Exergy	204,46	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	439,98	K
Entropy Isent	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	558,47	kJ/kg
Entropy	1,62	kJ/kg-K
Enthalpy	576,46	kJ/kg
Exergy	90,04	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

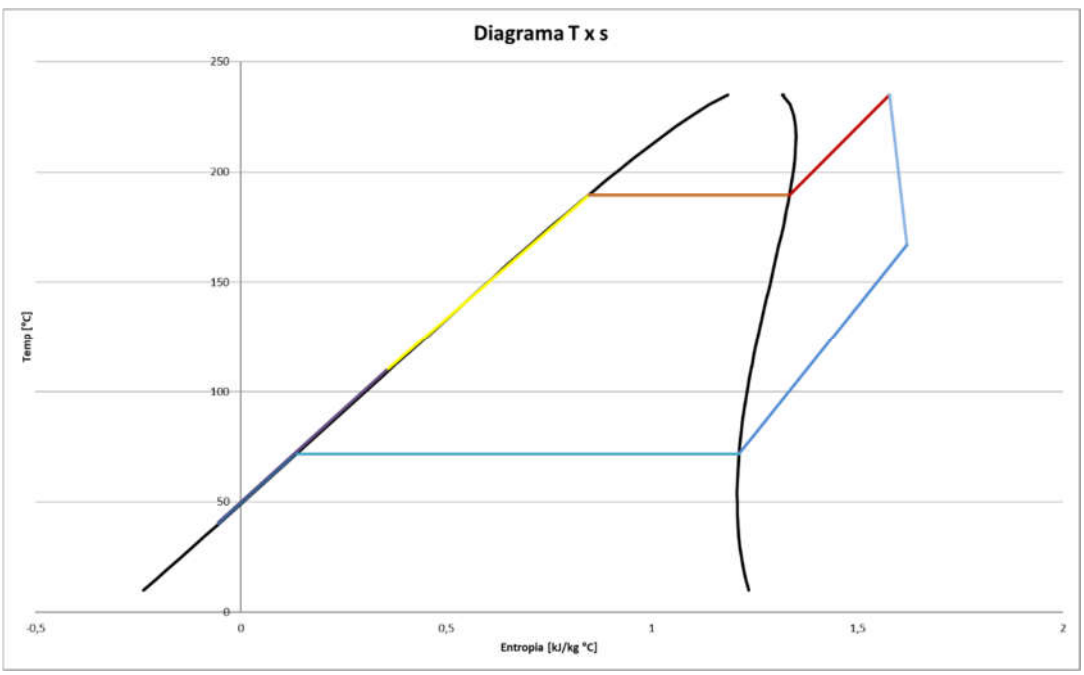
Pressure	200	kPa
Temperature	352,48	°C
Entropy	1,24	kJ/kg-K
Enthalpy	427,85	kJ/kg
Exergy	54,36	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	445,38	kJ/kg
Wpump	3,19	kJ/kg
Woutput	101,97	kJ/kg
Efic	17,0%	
Rejected heat	10243,7	kW
Regeneration	3418,1	kW
Efect. Calc	0,252	
External Heat	13354,2	kW
Pump Power	73,3	kW
Turbine Power	2345,2	kW
Net Power	2271,9	kW
Inlet Exergy	7887,2	
Overall Exergy Efic	28,8%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	8483,15
Evap Flue Side	-6467,62
Evaporator	2015,53
Turbine	286,40
Cond Fluid Side	-9006,45
Cond Water Side	10006,03
Condenser	999,58
Reg Cold Side	2830,797
Reg Hot Side	-2597,42
Regenerator	233,3788
Pump	3,52
Total Destruction	3538,41
Exergy in Flue	7887,236



III.1.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2000	kPa
Temperature	293,8	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,31	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,37	kJ/kg
Density	1480,20	kg/m³
Exergy	1,50	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1900	kPa
Temperature Regen	337,51	K
Entropy Sat	1,46	kJ/kg-K
Entropy	1,21	
Enthalpy	265,68	kJ/kg
Exergy	2,47	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1805	kPa
Temperature	451,71	K
Entropy	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy	496,34	kJ/kg
Exergy	60,76	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	384,81	K
Entropy Isent	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	452,14	kJ/kg
Entropy	1,80	kJ/kg-K
Enthalpy	458,77	kJ/kg
Exergy	17,94	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

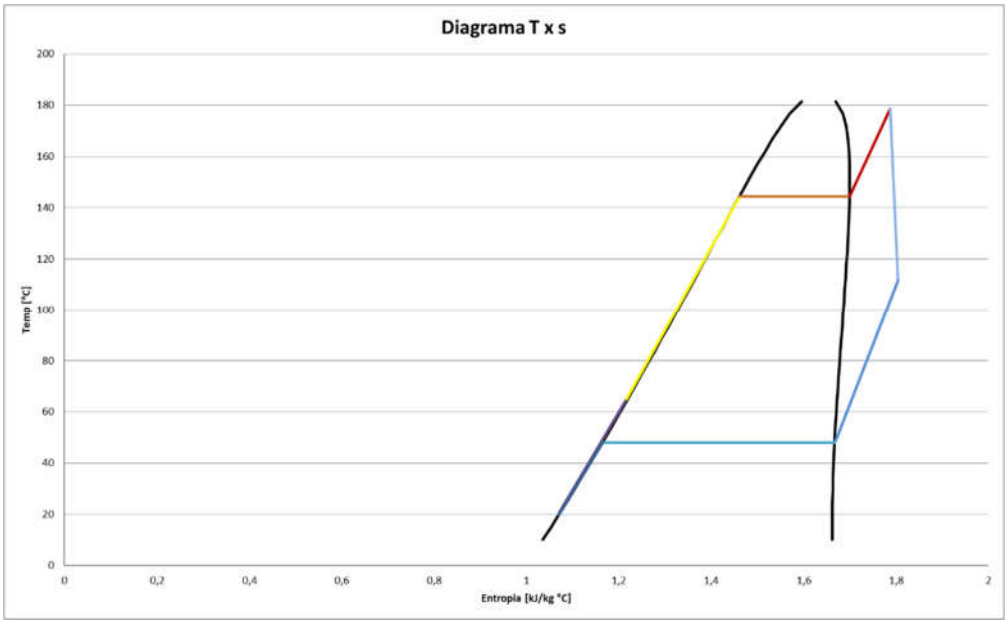
Pressure	200	kPa
Temperature	323,62	°C
Entropy	1,67	kJ/kg-K
Enthalpy	412,14	kJ/kg
Exergy	11,02	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	192,04	kJ/kg
Wpump	1,28	kJ/kg
Woutput	37,57	kJ/kg
Efic	14,9%	
Rejected heat	10562,4	kW
Regeneration	2564,9	kW
Efect. Calc	0,196	
External Heat	13354,2	kW
Pump Power	70,5	kW
Turbine Power	2066,3	kW
Net Power	1995,9	kW
Inlet Exergy	7887,2	
Overall Exergy Efic	25,3%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	9480,54
Evap Flue Side	-6467,62
Evaporator	3012,92
Turbine	288,56
Cond Fluid Side	-9971,52
Cond Water Side	10309,95
Condenser	338,43
Reg Cold Side	2383,106
Reg Hot Side	-2184,3
Regenerator	198,8023
Pump	3,61
Total Destruction	3842,33
Exergy in Flue	7887,236



III.1.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	464,76	K
Entropy	1,55	kJ/kg-K
Enthalpy	627,32	kJ/kg
Exergy	159,43	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	404,06	K
Entropy Isent	1,55	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	524,51	kJ/kg
Entropy	1,59	kJ/kg-K
Enthalpy	539,93	kJ/kg
Exergy	60,45	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	338,91	°C
Entropy	1,24	kJ/kg-K
Enthalpy	407,16	kJ/kg
Exergy	35,39	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

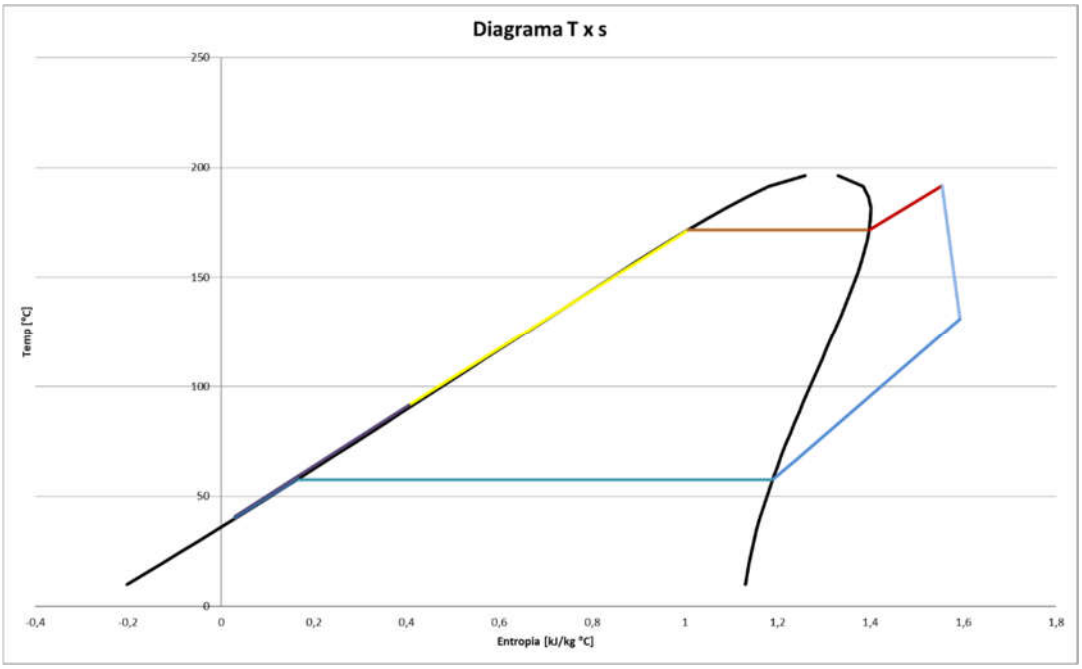
Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	397,73	kJ/kg
Wpump	3,81	kJ/kg
Woutput	87,39	kJ/kg
Efic	16,3%	
Rejected heat	10340,9	kW
Regeneration	3452,0	kW
Efect. Calc	0,252	
External Heat	13354,2	kW
Pump Power	99,2	kW
Turbine Power	2272,1	kW
Net Power	2173,0	kW
Inlet Exergy	7887,2	
Overall Exergy Efic	27,6%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	8993,91
Evap Flue Side	-6467,62
Evaporator	2526,29
Turbine	301,52
Cond Fluid Side	-9439,20
Cond Water Side	10098,81
Condenser	659,61
Reg Cold Side	2939,629
Reg Hot Side	-2800,62
Regenerator	139,0141
Pump	4,76
Total Destruction	3631,19

Exergy in Flue 7887,236



III.1.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	422,03	K
Entropy	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy	518,23	kJ/kg
Exergy	65,48	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	353,66	K
Entropy Isent	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	467,70	kJ/kg
Entropy	1,90	kJ/kg-K
Enthalpy	475,28	kJ/kg
Exergy	16,01	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	309,03	°C
Entropy	1,76	kJ/kg-K
Enthalpy	431,36	kJ/kg
Exergy	12,06	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	205,48	kJ/kg
Wpump	1,86	kJ/kg
Woutput	42,95	kJ/kg
Efic	15,7%	
Rejected heat	10479,3	kW
Regeneration	2239,6	kW
Efect. Calc	0,177	
External Heat	13354,2	kW
Pump Power	95,1	kW
Turbine Power	2190,3	kW
Net Power	2095,2	kW
Inlet Exergy	7887,2	
Overall Exergy Efic	26,6%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	9893,70
Evap Flue Side	-6467,62
Evaporator	3426,08
Turbine	332,73
Cond Fluid Side	-10315,68
Cond Water Side	10503,31
Condenser	187,63
Reg Cold Side	2122,624
Reg Hot Side	-2038,24
Regenerator	84,38165
Pump	4,87
Total Destruction	4035,69
Exergy in Flue	7887,236

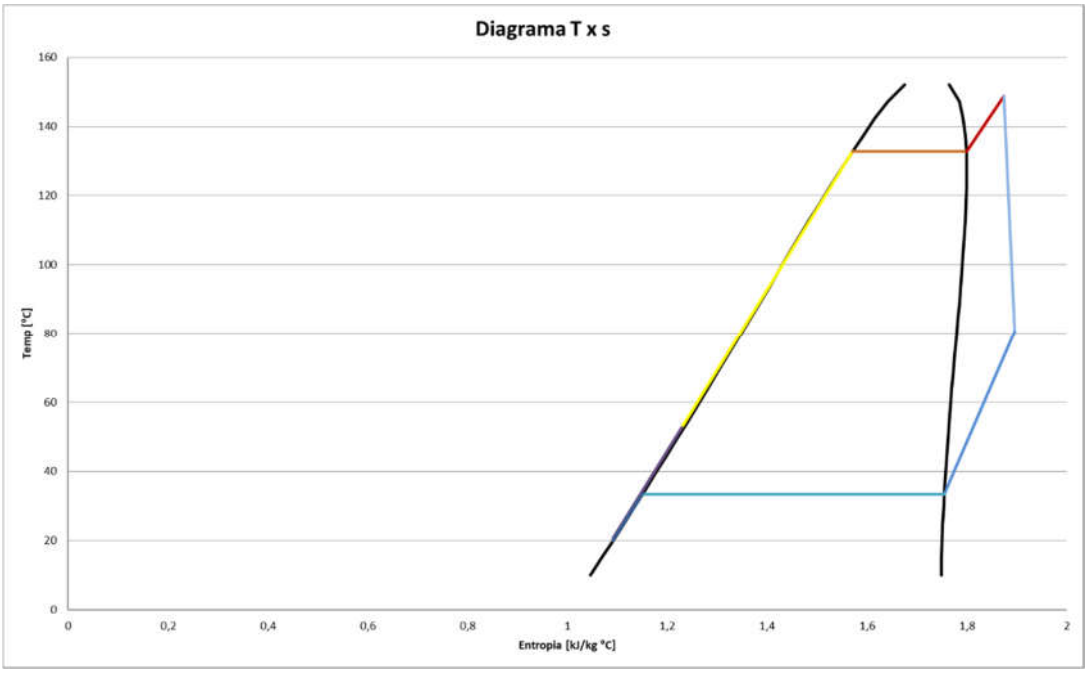


Diagrama T x s
Temp [°C]
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8
2
Entropia [kJ/kg °C]

III.2 – Cimento

III.2.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-17,53	kJ/kg
Density	725,53	kg/m³
Exergy	0,57	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	508,90	K
Entropy	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy	680,38	kJ/kg
Exergy	205,26	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	440,88	K
Entropy Isent	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	560,12	kJ/kg
Entropy	1,62	kJ/kg-K
Enthalpy	578,16	kJ/kg
Exergy	90,58	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

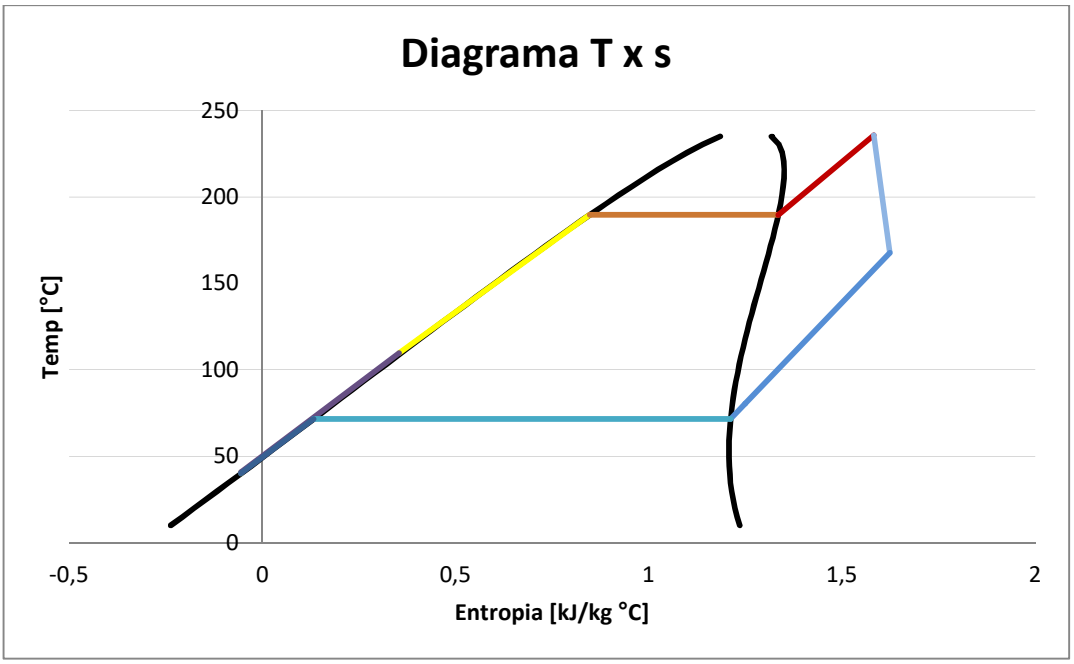
Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	353,61	°C
Entropy	1,25	kJ/kg-K
Enthalpy	429,54	kJ/kg
Exergy	54,61	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	10729,65
Evap Flue Side	-9218,89
Evaporator	1510,76
Turbine	361,27
	-
Cond Fluid Side	11397,95
Cond Water Side	12587,55
Condenser	1189,60
Reg Cold Side	3569,265
Reg Hot Side	-3266,67
Regenerator	302,5913
Pump	4,44
Total Destruction	3368,66

Energy Balance Calculations	
Cond. Heat Output	447,07
Wpump	3,19
Woutput	102,22
Efic	17,0%
Rejected heat	12965,2
Regeneration	4309,8
Efect. Calc	0,251
External Heat	16897,4
Pump Power	92,5
Turbine Power	2964,4
Net Power	2871,9
Inlet Exergy	13454,9
Overall Exergy Efic	21,3%



III.2.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2000	kPa
Temperature	293,8	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,31	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,37	kJ/kg
Density	1480,20	kg/m³
Exergy	1,50	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1900	kPa
Temperature Regen	337,51	K
Entropy Sat	1,46	kJ/kg-K
Entropy	1,21	
Enthalpy	265,68	kJ/kg
Exergy	2,47	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1805	kPa
Temperature	450,33	K
Entropy	1,78	kJ/kg-K
Enthalpy	495,00	kJ/kg
Exergy	60,31	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	383,34	K
Entropy Isent	1,78	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	451,02	kJ/kg
Entropy	1,80	kJ/kg-K
Enthalpy	457,62	kJ/kg
Exergy	17,70	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

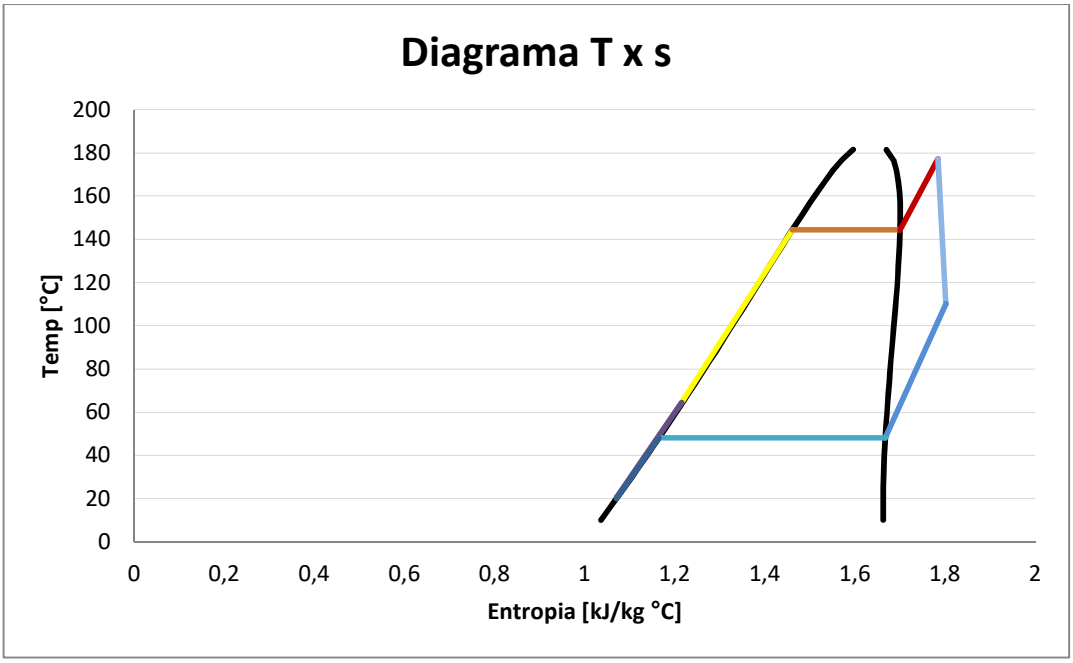
Pressure	200	kPa
Temperature	322,07	°C
Entropy	1,67	kJ/kg-K
Enthalpy	410,99	kJ/kg
Exergy	10,95	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	12003,47
Evap Flue Side	-9218,89
Evaporator	2784,58
Turbine	366,80
Cond Fluid Side	-12615,92
Cond Water Side	12961,85
Condenser	345,94
Reg Cold Side	3033,044
Reg Hot Side	-2792
Regenerator	241,0467
Pump	4,60
Total Destruction	3742,96
Exergy in Flue	13454,9

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	190,89	kJ/kg
Wpump	1,28	kJ/kg
Woutput	37,38	kJ/kg
Efic	15,0%	
Rejected heat	13362,5	kW
Regeneration	3264,4	kW
Efect. Calc	0,197	
External Heat	16897,4	kW
Pump Power	89,7	kW
Turbine Power	2616,6	kW
Net Power	2526,9	kW
Inlet Exergy	13454,9	
Overall Exergy Efic	18,8%	



III.2.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	459,37	K
Entropy	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy	611,52	kJ/kg
Exergy	153,93	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	397,64	K
Entropy Isent	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	511,04	kJ/kg
Entropy	1,56	kJ/kg-K
Enthalpy	526,11	kJ/kg
Exergy	57,01	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

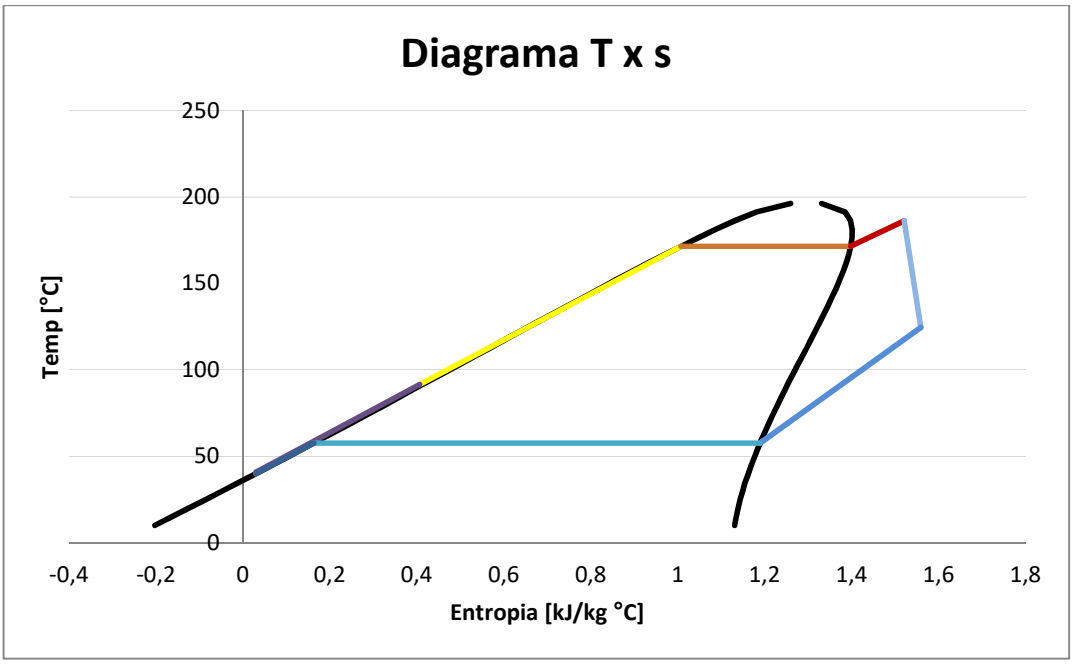
Pressure	200	kPa
Temperature	331,66	°C
Entropy	1,19	kJ/kg-K
Enthalpy	393,34	kJ/kg
Exergy	33,99	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	11410,98
Evap Flue Side	-9218,89
Evaporator	2192,09
Turbine	391,57
	-
Cond Fluid Side	11921,52
Cond Water Side	12670,22
Condenser	748,70
Reg Cold Side	3844,131
Reg Hot Side	-3731,37
Regenerator	112,7569
Pump	6,22
Total Destruction	3451,33

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	383,91	kJ/kg
Wpump	3,81	kJ/kg
Woutput	85,40	kJ/kg
Efic	16,4%	
Rejected heat	13052,9	kW
Regeneration	4514,2	kW
Efect. Calc	0,259	
External Heat	16897,4	kW
Pump Power	129,7	kW
Turbine Power	2903,7	kW
Net Power	2774,0	kW
Inlet Exergy	13454,9	
Overall Exergy Efic	20,6%	



III.2.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	420,80	K
Entropy	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy	516,43	kJ/kg
Exergy	64,97	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	352,14	K
Entropy Isent	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	466,23	kJ/kg
Entropy	1,89	kJ/kg-K
Enthalpy	473,76	kJ/kg
Exergy	15,79	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

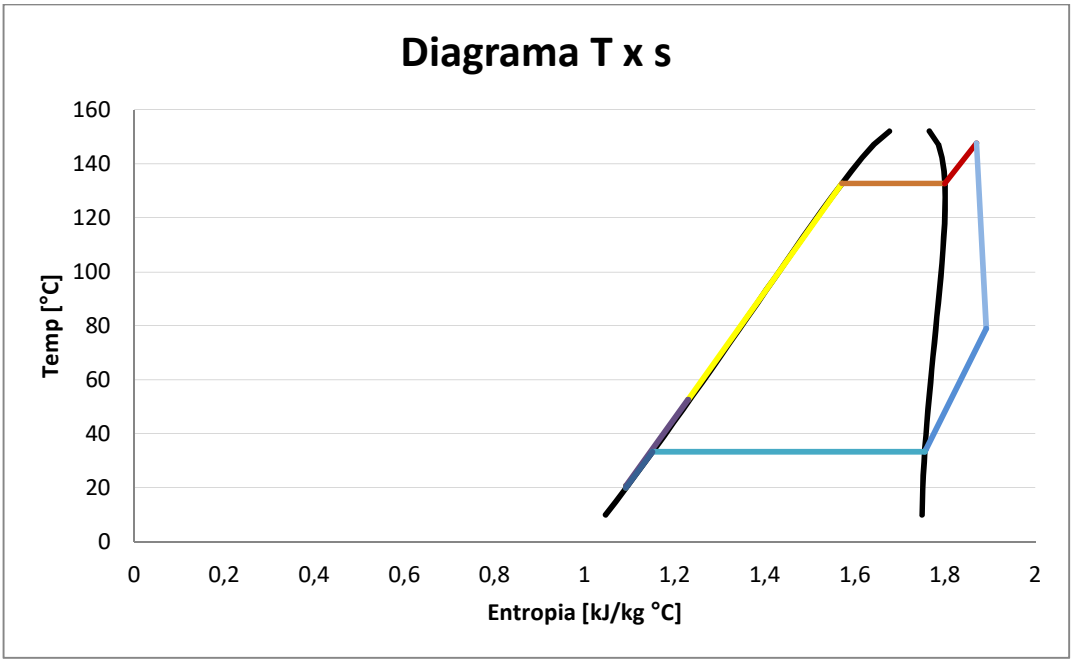
Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	307,49	°C
Entropy	1,76	kJ/kg-K
Enthalpy	429,85	kJ/kg
Exergy	12,03	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	12526,38
Evap Flue Side	-9218,89
Evaporator	3307,49
Turbine	423,17
	-
Cond Fluid Side	13051,12
Cond Water Side	13203,42
Condenser	152,30
Reg Cold Side	2705,305
Reg Hot Side	-2609,95
Regenerator	95,35991
Pump	6,21
Total Destruction	3984,53

Energy Balance Calculations	
Cond. Heat Output	203,96
Wpump	1,86
Woutput	42,67
Efic	15,7%
Rejected heat	13257,3
Regeneration	2854,4
Efect. Calc	0,179
External Heat	16897,4
Pump Power	121,2
Turbine Power	2773,7
Net Power	2652,5
Inlet Exergy	13454,9
Overall Exergy Efic	19,7%



III.3 – Alumínio

III.3.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	
Temperature	313,15	
Entropy	-0,06	
Enthalpy	-17,53	
Density	725,53	
Exergy	0,57	
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	505,50	K
Entropy	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy	672,21	kJ/kg
Exergy	201,94	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	437,11	K
Entropy Isent	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	553,20	kJ/kg
Entropy	1,61	kJ/kg-K
Enthalpy	571,05	kJ/kg
Exergy	88,35	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

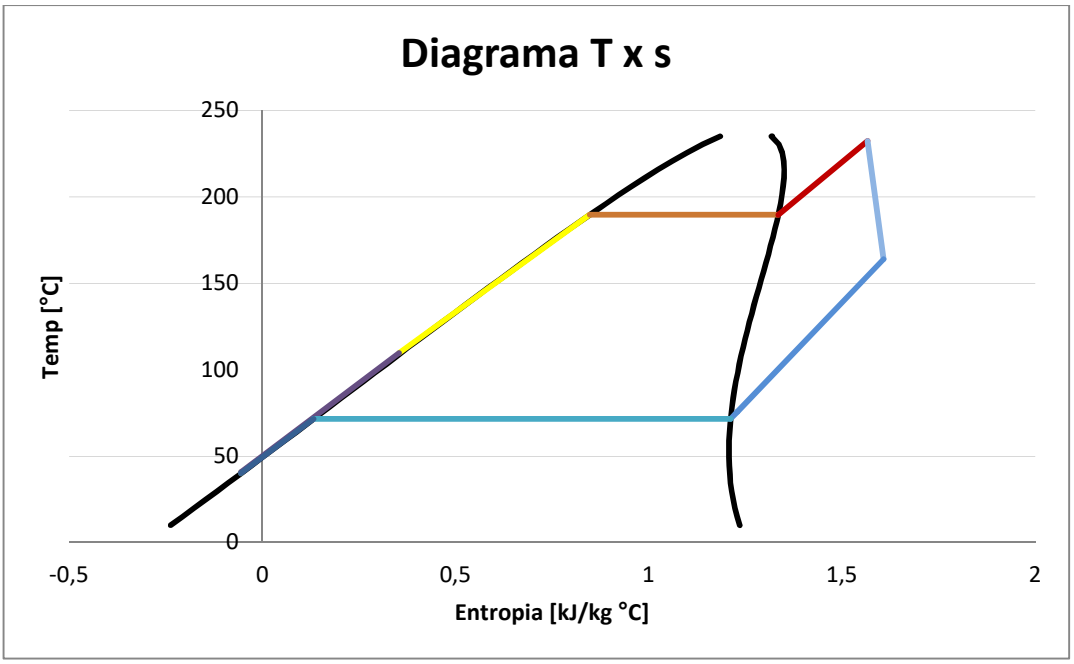
Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	348,86	°C
Entropy	1,23	kJ/kg-K
Enthalpy	422,44	kJ/kg
Exergy	53,60	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	6572,46
Evap Flue Side	-5058,72
Evaporator	1513,74
Turbine	223,83
Cond Fluid Side	-6964,94
Cond Water Side	7776,42
Condenser	811,48
Reg Cold Side	2215,406
Reg Hot Side	-2049,51
Regenerator	165,8935
Pump	2,75
Total Destruction	2717,69

Energy Balance Calculations		
Cond. Heat Output	439,97	kJ/kg
Wpump	3,19	kJ/kg
Woutput	101,15	kJ/kg
Efic	17,1%	
Rejected heat	7919,5	kW
Regeneration	2675,1	kW
Efect. Calc	0,254	
External Heat	10333,3	kW
Pump Power	57,4	kW
Turbine Power	1820,8	kW
Net Power	1763,4	kW
Inlet Exergy	5647,5	
Overall Exergy Efic	31,2%	



III.3.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2000	kPa
Temperature	293,8	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,31	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,37	kJ/kg
Density	1480,20	kg/m³
Exergy	1,50	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1900	kPa
Temperature Regen	337,51	K
Entropy Sat	1,46	kJ/kg-K
Entropy	1,21	
Enthalpy	265,68	kJ/kg
Exergy	2,47	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1805	kPa
Temperature	454,88	K
Entropy	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy	499,40	kJ/kg
Exergy	61,79	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	388,16	K
Entropy Isent	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	454,70	kJ/kg
Entropy	1,81	kJ/kg-K
Enthalpy	461,40	kJ/kg
Exergy	18,53	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

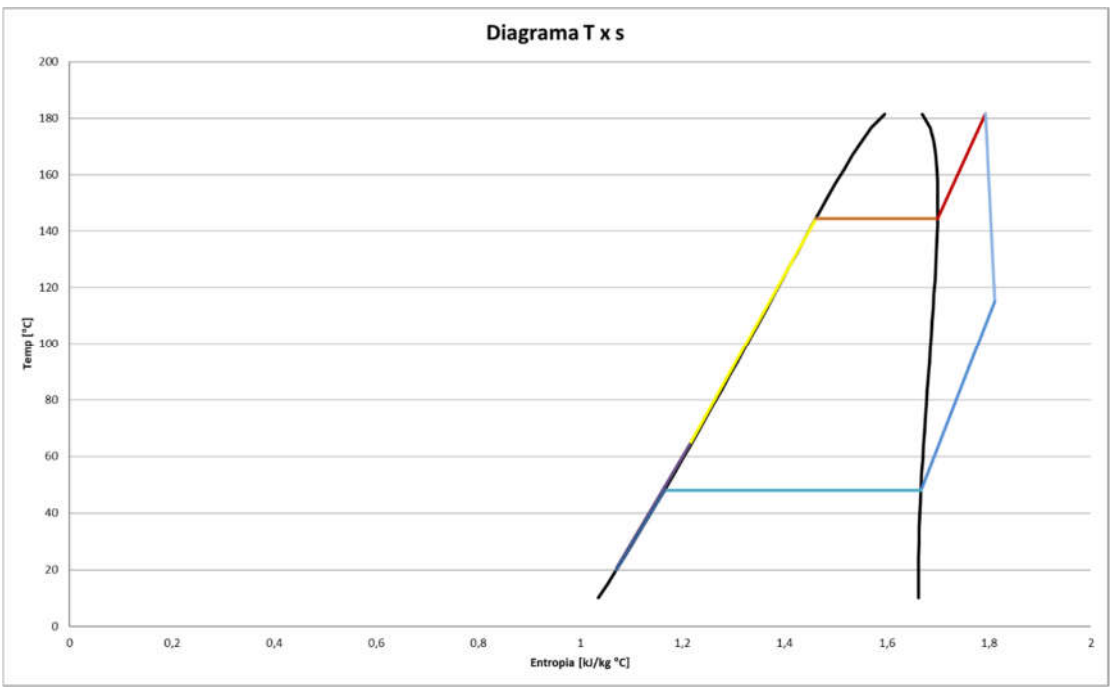
Pressure	200	kPa
Temperature	327,16	°C
Entropy	1,68	kJ/kg-K
Enthalpy	414,77	kJ/kg
Exergy	11,22	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	194,68	kJ/kg
Wpump	1,28	kJ/kg
Woutput	38,00	kJ/kg
Efic	14,9%	
Rejected heat	8176,4	kW
Regeneration	1958,6	kW
Efect. Calc	0,194	
External Heat	10333,3	kW
Pump Power	53,8	kW
Turbine Power	1596,1	kW
Net Power	1542,3	kW
Inlet Exergy	5647,5	
Overall Exergy Efic	27,3%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	7325,21
Evap Flue Side	-5058,72
Evaporator	2266,49
Turbine	220,97
Cond Fluid Side	-7716,93
Cond Water Side	8024,01
Condenser	307,08
Reg Cold Side	1819,826
Reg Hot Side	-1651,84
Regenerator	167,9858
Pump	2,76
Total Destruction	2965,29
Exergy in Flue	5647,519



III.3.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	465,76	K
Entropy	1,56	kJ/kg-K
Enthalpy	630,21	kJ/kg
Exergy	160,45	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	405,23	K
Entropy Isent	1,56	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	526,98	kJ/kg
Entropy	1,60	kJ/kg-K
Enthalpy	542,46	kJ/kg
Exergy	61,09	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

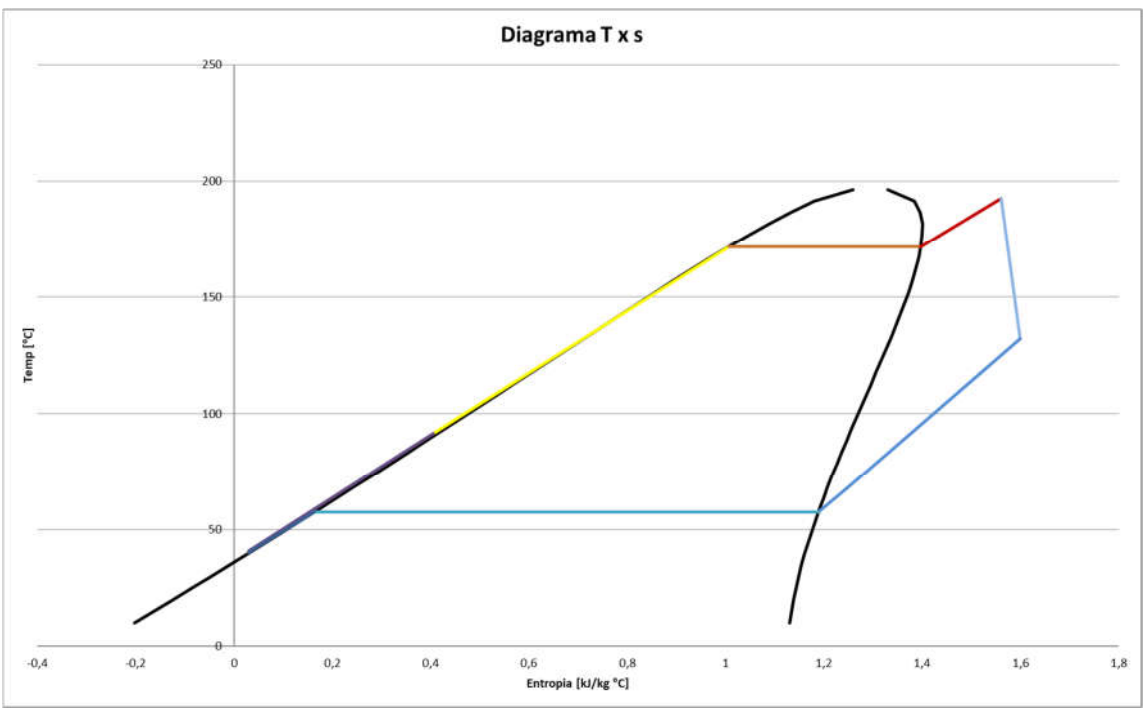
Pressure	200	kPa
Temperature	340,23	°C
Entropy	1,24	kJ/kg-K
Enthalpy	409,69	kJ/kg
Exergy	35,68	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	400,26	kJ/kg
Wpump	3,81	kJ/kg
Woutput	87,75	kJ/kg
Efic	16,2%	
Rejected heat	8005,2	kW
Regeneration	2655,4	kW
Efect. Calc	0,251	
External Heat	10333,3	kW
Pump Power	76,3	kW
Turbine Power	1755,0	kW
Net Power	1678,7	kW
Inlet Exergy	5647,5	
Overall Exergy Efic	29,7%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	6955,78
Evap Flue Side	-5058,72
Evaporator	1897,05
Turbine	232,22
Cond Fluid Side	-7305,81
Cond Water Side	7859,05
Condenser	553,25
Reg Cold Side	2261,253
Reg Hot Side	-2147,1
Regenerator	114,151
Pump	3,66
Total Destruction	2800,33
Exergy in Flue	5647,519



III.3.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	424,07	K
Entropy	1,88	kJ/kg-K
Enthalpy	521,18	kJ/kg
Exergy	66,34	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	356,17	K
Entropy Isent	1,88	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	470,12	kJ/kg
Entropy	1,90	kJ/kg-K
Enthalpy	477,78	kJ/kg
Exergy	16,39	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	311,58	°C
Entropy	1,77	kJ/kg-K
Enthalpy	433,87	kJ/kg
Exergy	12,14	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	207,98	kJ/kg
Wpump	1,86	kJ/kg
Woutput	43,40	kJ/kg
Efic	15,7%	
Rejected heat	8111,2	kW
Regeneration	1712,7	kW
Efect. Calc	0,176	
External Heat	10333,3	kW
Pump Power	72,7	kW
Turbine Power	1692,5	kW
Net Power	1619,8	kW
Inlet Exergy	5647,5	
Overall Exergy Efic	28,7%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	7647,75
Evap Flue Side	-5058,72
Evaporator	2589,03
Turbine	255,30
Cond Fluid Side	-7983,22
Cond Water Side	8174,48
Condenser	191,26
Reg Cold Side	1623,183
Reg Hot Side	-1546,75
Regenerator	76,43775
Pump	3,73
Total Destruction	3115,75
Exergy in Flue	5647,519

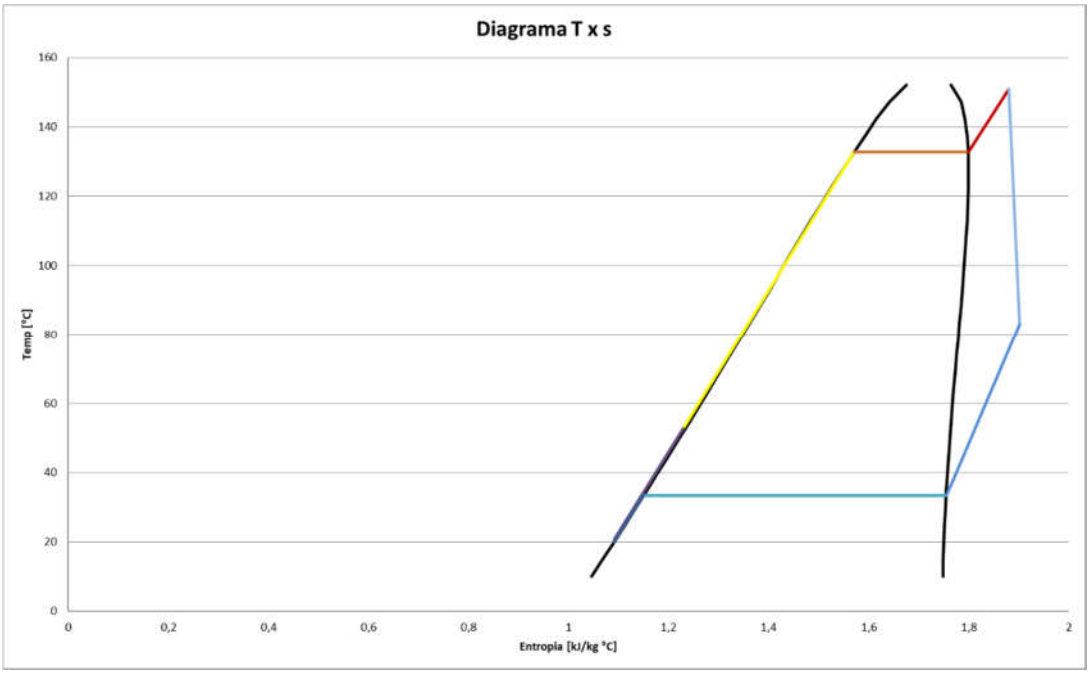


Diagrama T x s
Temp [°C]
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8
2
Entropia [kJ/kg °C]

III.4 – Siderurgia

III.4.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-17,53	kJ/kg
Density	725,53	kg/m³
Exergy	0,57	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	505,64	K
Entropy	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy	672,53	kJ/kg
Exergy	202,07	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	437,26	K
Entropy Isent	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	553,47	kJ/kg
Entropy	1,61	kJ/kg-K
Enthalpy	571,33	kJ/kg
Exergy	88,43	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

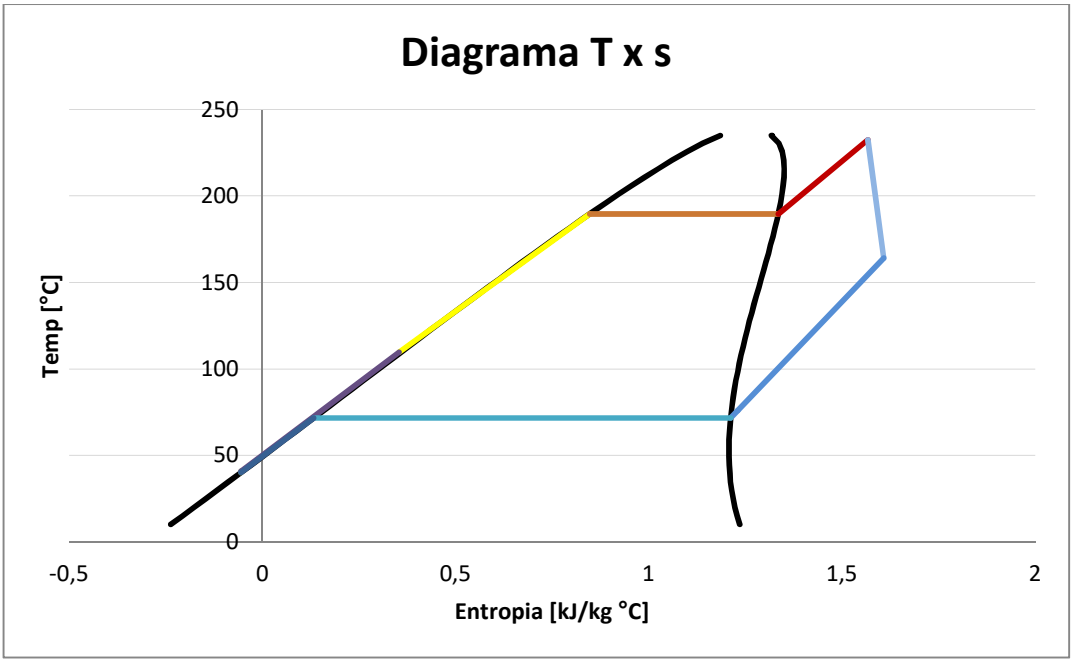
Pressure	200	kPa
Temperature	349,04	°C
Entropy	1,23	kJ/kg-K
Enthalpy	422,72	kJ/kg
Exergy	53,63	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	11690,47
Evap Flue Side	-11345,72
Evaporator	344,75
Turbine	397,94
Cond Fluid Side	-12389,78
Cond Water Side	13643,55
Condenser	1253,77
Reg Cold Side	3938,5
Reg Hot Side	-3642,03
Regenerator	296,4709
Pump	4,89
Total Destruction	2297,83
Exergy in Flue	9046,284

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	440,25	kJ/kg
Wpump	3,19	kJ/kg
Woutput	101,20	kJ/kg
Efic	17,1%	
Rejected heat	14087,9	kW
Regeneration	4755,6	kW
Efect. Calc	0,254	
External Heat	18381,0	kW
Pump Power	102,0	kW
Turbine Power	3238,3	kW
Net Power	3136,3	kW
Inlet Exergy	9046,3	
Overall Exergy Efic	34,7%	



III.4.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2000	kPa
Temperature	293,8	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,31	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,37	kJ/kg
Density	1480,20	kg/m³
Exergy	1,50	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1900	kPa
Temperature Regen	337,51	K
Entropy Sat	1,46	kJ/kg-K
Entropy	1,21	
Enthalpy	265,68	kJ/kg
Exergy	2,47	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1805	kPa
Temperature	450,78	K
Entropy	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy	495,44	kJ/kg
Exergy	60,46	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	383,82	K
Entropy Isent	1,79	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	451,39	kJ/kg

Entropy	1,80	kJ/kg-K
Enthalpy	458,00	kJ/kg
Exergy	17,78	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

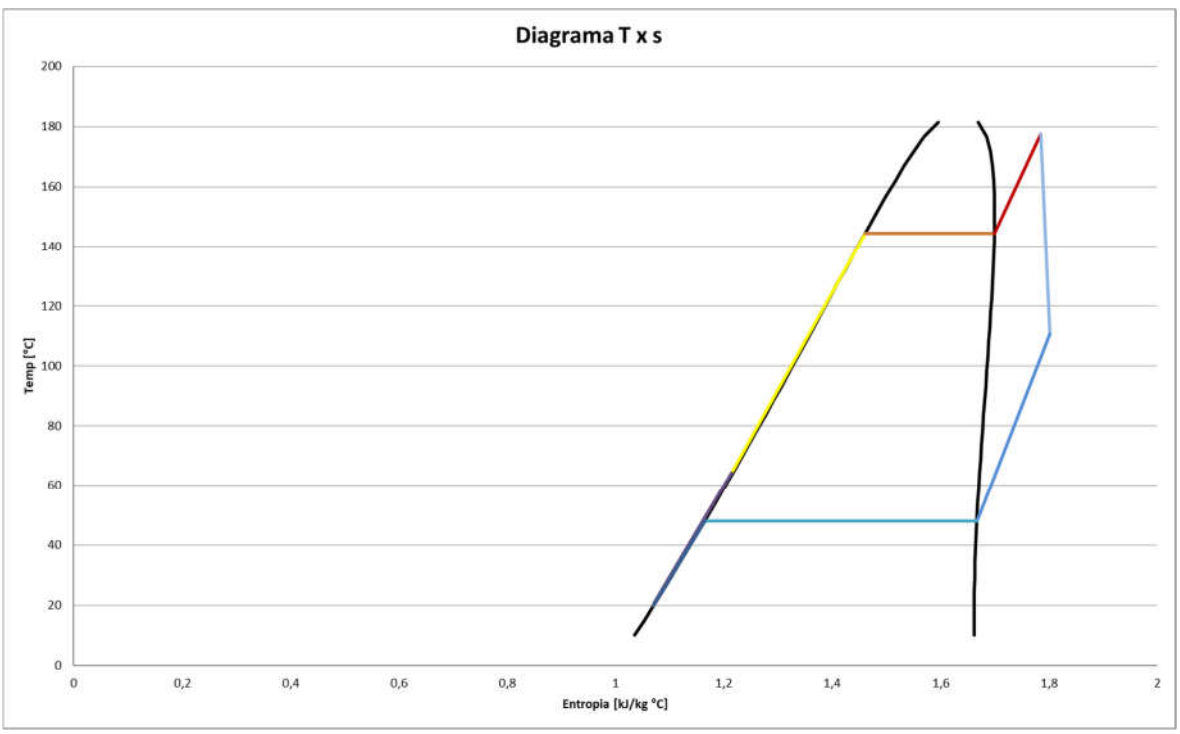
Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	322,58	°C
Entropy	1,67	kJ/kg-K
Enthalpy	411,36	kJ/kg
Exergy	10,97	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	191,27	kJ/kg
Wpump	1,28	kJ/kg
Woutput	37,44	kJ/kg
Efic	15,0%	
Rejected heat	14536,5	kW
Regeneration	3544,2	kW
Efect. Calc	0,197	
External Heat	18381,0	kW
Pump Power	97,4	kW
Turbine Power	2845,6	kW
Net Power	2748,2	kW
Inlet Exergy	9046,3	
Overall Exergy Efic.	30,4%	

Exergy Destruction Calculations	
Evap Fluid Side	13054,70
Evap Flue Side	-11345,72
Evaporator	1708,98
Turbine	398,40
Cond Fluid Side	-13724,09
Cond Water Side	14064,05
Condenser	339,96
Reg Cold Side	3293,019
Reg Hot Side	-3027,03
Regenerator	265,9892
Pump	4,99
Total Destruction	2718,33
Exergy in Flue	9046,284



III.4.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	459,30	K
Entropy	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy	611,33	kJ/kg
Exergy	153,86	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	397,56	K
Entropy Isent	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	510,88	kJ/kg
Entropy	1,56	kJ/kg-K
Enthalpy	525,95	kJ/kg
Exergy	56,97	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

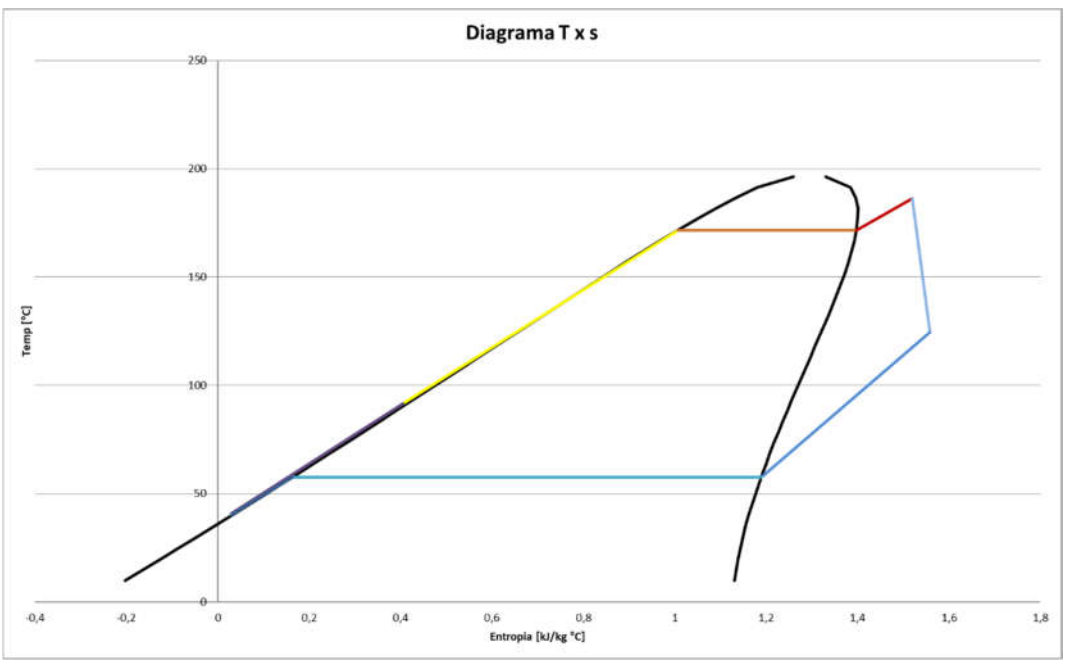
Pressure	200	kPa
Temperature	331,58	°C
Entropy	1,19	kJ/kg-K
Enthalpy	393,18	kJ/kg
Exergy	33,97	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	383,74	kJ/kg
Wpump	3,81	kJ/kg
Woutput	85,38	kJ/kg
Efic	16,4%	
Rejected heat	14198,5	kW
Regeneration	4912,5	kW
Efect. Calc	0,259	
External Heat	18381,0	kW
Pump Power	141,1	kW
Turbine Power	3159,0	kW
Net Power	3017,9	kW
Inlet Exergy	9046,3	
Overall Exergy Efic	33,4%	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	12413,23
Evap Flue Side	-11345,72
Evaporator	1067,50
Turbine	426,08
Cond Fluid Side	-12967,86
Cond Water Side	13747,24
Condenser	779,38
Reg Cold Side	4183,319
Reg Hot Side	-4061,54
Regenerator	121,7836
Pump	6,77
Total Destruction	2401,52
Exergy in Flue	9046,284



III.4.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	420,10	K
Entropy	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy	515,42	kJ/kg
Exergy	64,68	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	351,28	K
Entropy Isent	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	465,40	kJ/kg
Entropy	1,89	kJ/kg-K

Enthalpy	472,90	kJ/kg
Exergy	15,67	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	306,61	°C
Entropy	1,75	kJ/kg-K
Enthalpy	428,99	kJ/kg
Exergy	12,01	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

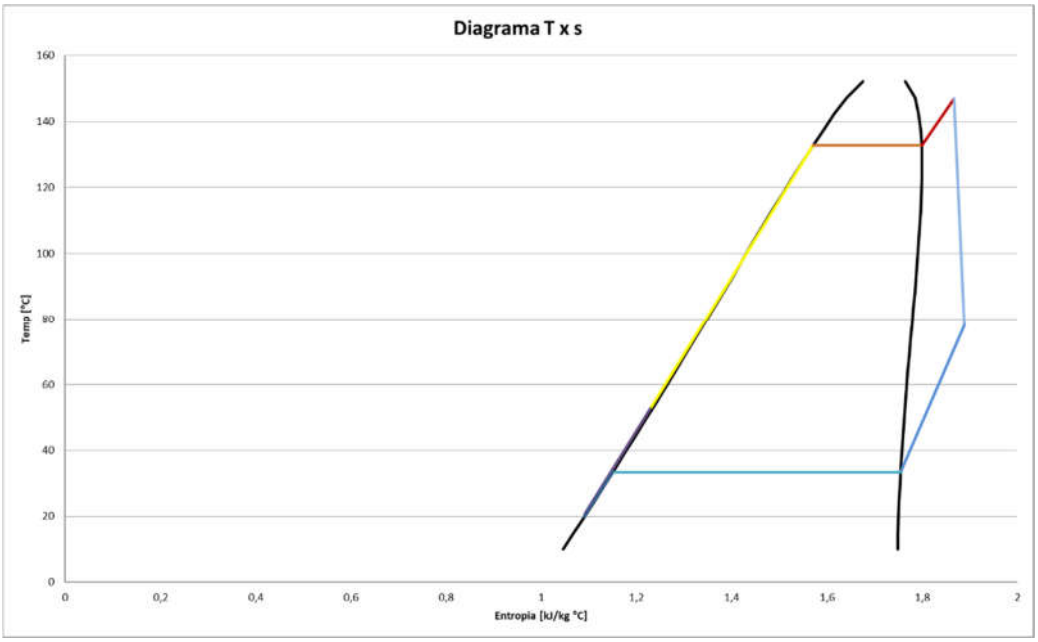
Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	203,10
Wpump	1,86
Woutput	42,52
Efic	15,7%
Rejected heat	14419,9
Regeneration	3117,9
Efect. Calc	0,179
External Heat	18381,0
Pump Power	132,4
Turbine Power	3018,6
Net Power	2886,2
Inlet Exergy	9046,3
Overall Exergy Efic	31,9%

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	13630,81
Evap Flue Side	-11345,72
Evaporator	2285,09
Turbine	461,66
Cond Fluid Side	-14195,79
Cond Water Side	13954,77
Condenser	-241,03
Reg Cold Side	2955,026
Reg Hot Side	-2858,49
Regenerator	96,53821
Pump	6,78

Total Destruction	2609,04
Exergy in Flue	9046,284



III.5 – Vidros

III.5.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-17,53	kJ/kg
Density	725,53	kg/m³
Exergy	0,57	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	505,48	K
Entropy	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy	672,15	kJ/kg
Exergy	201,92	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	437,09	K
Entropy Isent	1,57	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	553,16	kJ/kg
Entropy	1,61	kJ/kg-K
Enthalpy	571,01	kJ/kg
Exergy	88,33	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

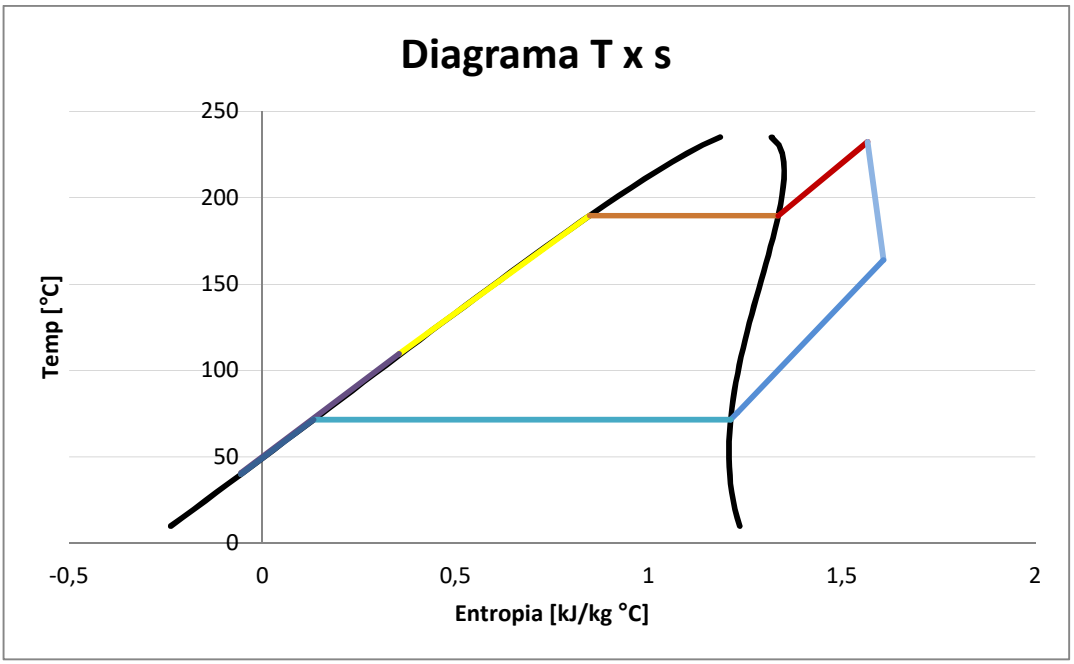
Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	348,83	°C
Entropy	1,23	kJ/kg-K
Enthalpy	422,39	kJ/kg
Exergy	53,59	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	11683,38
Evap Flue Side	-9090,13
Evaporator	2593,24
Turbine	397,91
Cond Fluid Side	-12380,85
Cond Water Side	13633,84
Condenser	1252,99
Reg Cold Side	3938,5
Reg Hot Side	-3643,83
Regenerator	294,6677
Pump	4,89
Total Destruction	4543,71
Exergy in Flue	14329,91

Energy Balance Calculations	
Cond. Heat Output	439,92
Wpump	3,19
Woutput	101,15
Efic	17,1%
Rejected heat	14077,6
Regeneration	4755,6
Efect. Calc	0,254
External Heat	18368,5
Pump Power	102,0
Turbine Power	3236,7
Net Power	3134,7
Inlet Exergy	14329,9
Overall Exergy Efic	21,9%



III.5.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2000	kPa
Temperature	293,8	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,31	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,37	kJ/kg
Density	1480,20	kg/m³
Exergy	1,50	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1900	kPa
Temperature Regen	337,51	K
Entropy Sat	1,46	kJ/kg-K
Entropy	1,21	
Enthalpy	265,68	kJ/kg
Exergy	2,47	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1805	kPa
Temperature	450,62	K
Entropy	1,78	kJ/kg-K
Enthalpy	495,28	kJ/kg
Exergy	60,41	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	383,65	K
Entropy Isent	1,78	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	451,26	kJ/kg
Entropy	1,80	kJ/kg-K
Enthalpy	457,86	kJ/kg
Exergy	17,75	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

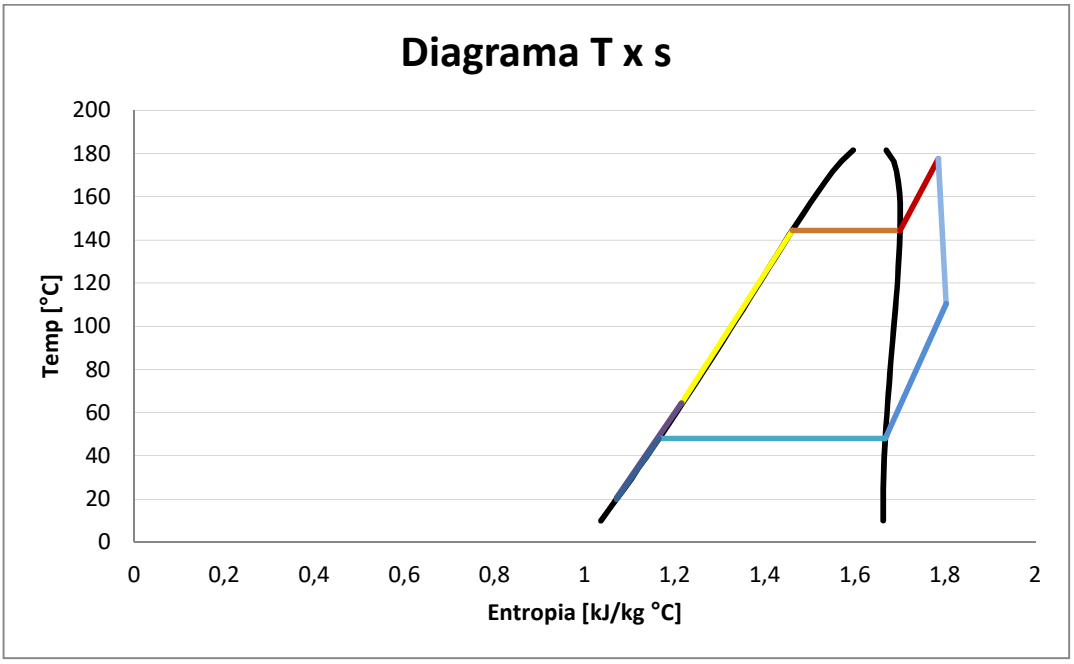
Pressure	200	kPa
Temperature	322,40	°C
Entropy	1,67	kJ/kg-K
Enthalpy	411,23	kJ/kg
Exergy	10,96	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	13046,74
Evap Flue Side	-9090,13
Evaporator	3956,61
Turbine	398,34
Cond Fluid Side	-13714,55
Cond Water Side	14054,48
Condenser	339,94
Reg Cold Side	3293,019
Reg Hot Side	-3028,55
Regenerator	264,4661
Pump	4,99
Total Destruction	4964,35
Exergy in Flue	14329,91

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	191,14	kJ/kg
Wpump	1,28	kJ/kg
Woutput	37,42	kJ/kg
Efic	15,0%	
Rejected heat	14526,3	kW
Regeneration	3544,2	kW
Efect. Calc	0,197	
External Heat	18368,5	kW
Pump Power	97,4	kW
Turbine Power	2843,9	kW
Net Power	2746,5	kW
Inlet Exergy	14329,9	
Overall Exergy Efic	19,2%	



III.5.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

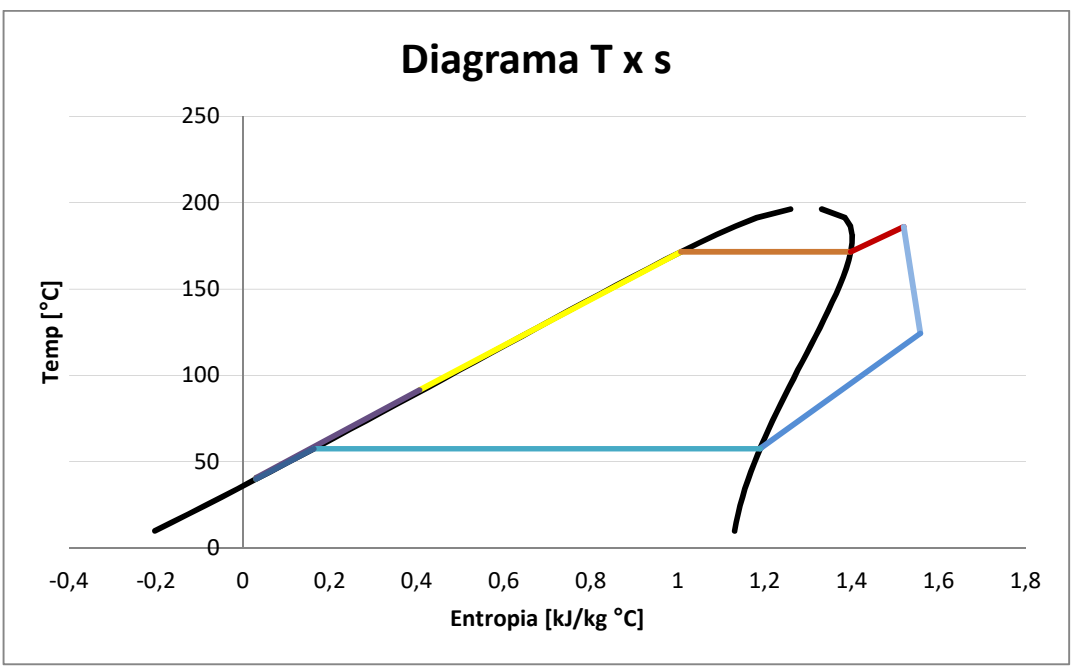
Pressure	2166	kPa
Temperature	459,20	K
Entropy	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy	611,00	kJ/kg
Exergy	153,75	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	397,43	K
Entropy Isent	1,52	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	510,61	kJ/kg
Entropy	1,56	kJ/kg-K
Enthalpy	525,67	kJ/kg
Exergy	56,90	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

Pressure	200	kPa
Temperature	331,43	°C
Entropy	1,19	kJ/kg-K
Enthalpy	392,90	kJ/kg
Exergy	33,94	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	



III.5.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	422,39	K
Entropy	1,88	kJ/kg-K
Enthalpy	518,76	kJ/kg
Exergy	65,64	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	354,11	K
Entropy Isent	1,88	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	468,14	kJ/kg
Entropy	1,90	kJ/kg-K
Enthalpy	475,73	kJ/kg
Exergy	16,08	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

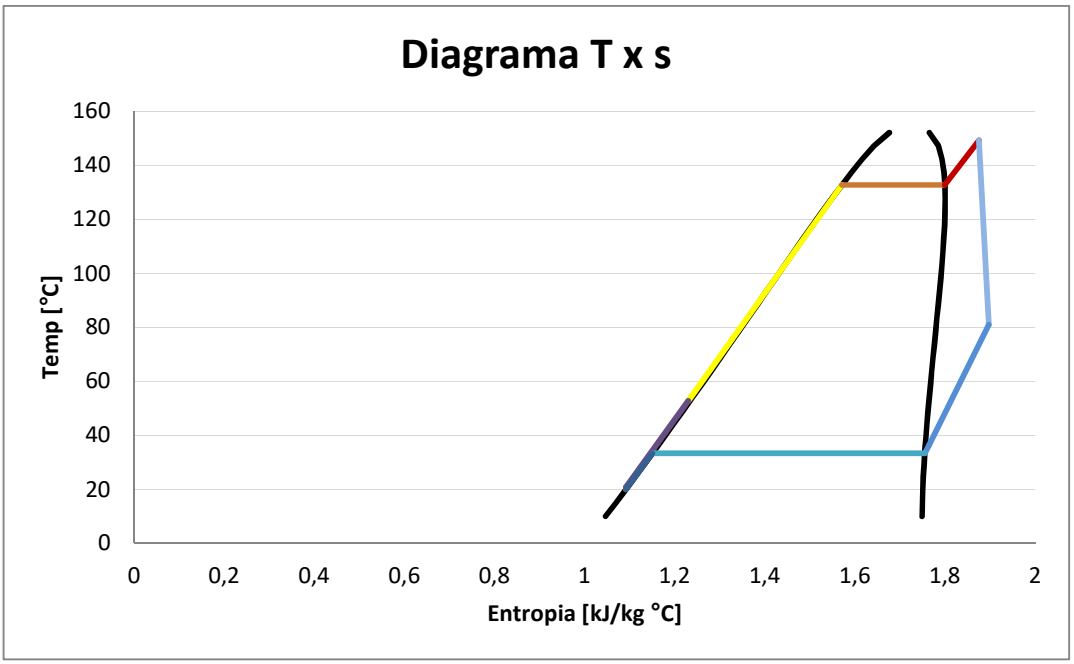
Pressure	200	kPa
Temperature	309,49	°C
Entropy	1,76	kJ/kg-K
Enthalpy	431,81	kJ/kg
Exergy	12,08	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	13606,14
Evap Flue Side	-9090,13
Evaporator	4516,00
Turbine	456,97
Cond Fluid Side	-14189,49
Cond Water Side	14318,47
Condenser	128,98
Reg Cold Side	2913,405
Reg Hot Side	-2793,71
Regenerator	119,691
Pump	6,69
Total Destruction	5228,33
Exergy in Flue	14329,91

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	205,93	kJ/kg
Wpump	1,86	kJ/kg
Woutput	43,03	kJ/kg
Efic	15,7%	
Rejected heat	14414,8	kW
Regeneration	3074,0	kW
Efect. Calc	0,177	
External Heat	18368,5	kW
Pump Power	130,5	kW
Turbine Power	3012,0	kW
Net Power	2881,5	kW
Inlet Exergy	14329,9	
Overall Exergy Efic	20,1%	



III.6 – Cerâmica – Caso A

III.6.1 – Ciclopentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-17,53	kJ/kg
Density	725,53	kg/m³
Exergy	0,57	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	313,9	K
Entropy Isent	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	-14,50	kJ/kg
Entropy	-0,06	kJ/kg-K
Enthalpy	-14,34	kJ/kg
Density	727,15	kg/m³
Exergy	3,60	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	382,79	K
Entropy Sat	0,85	kJ/kg-K
Entropy	0,35	
Enthalpy	126,84	kJ/kg
Exergy	21,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	502,83	K
Entropy	1,55	kJ/kg-K
Enthalpy	665,77	kJ/kg
Exergy	199,34	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	434,13	K
Entropy Isent	1,55	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	547,76	kJ/kg
Entropy	1,59	kJ/kg-K
Enthalpy	565,46	kJ/kg
Exergy	86,62	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

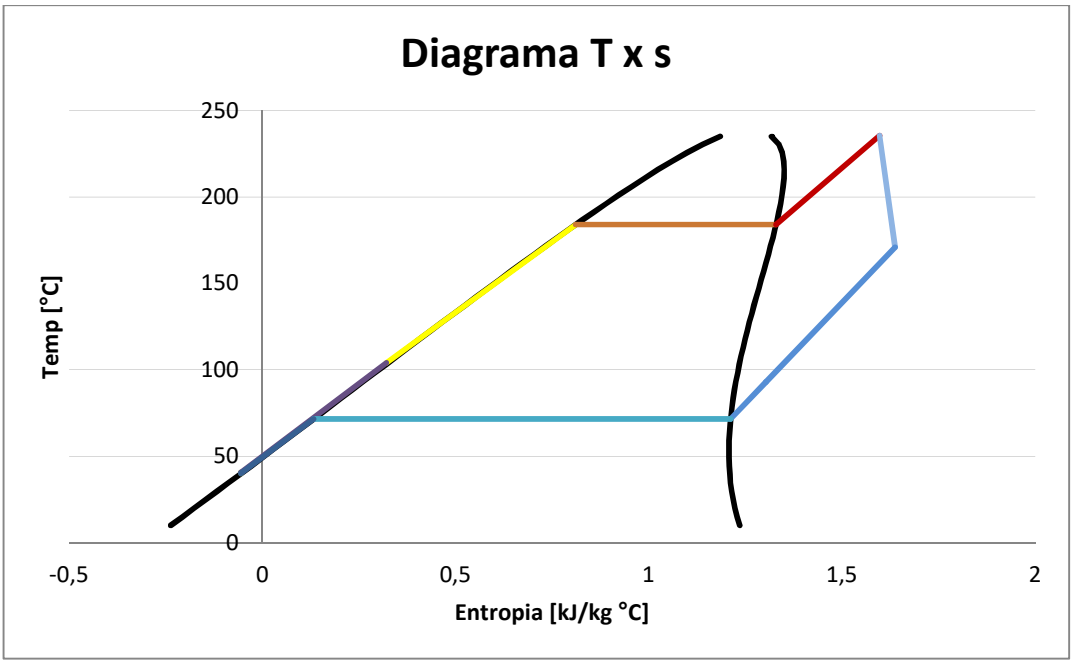
Pressure	200	kPa
Temperature	345,07	°C
Entropy	1,21	kJ/kg-K
Enthalpy	416,85	kJ/kg
Exergy	52,86	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	1336,77
Evap Flue Side	-924,85
Evaporator	411,92
Turbine	45,94
Cond Fluid Side	-1413,72
Cond Water Side	1601,19
Condenser	187,47
Reg Cold Side	455,389
Reg Hot Side	-424,944
Regenerator	30,44505
Pump	0,57
Total Destruction	676,34
Exergy in Flue	1234,286

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	434,38	kJ/kg
Wpump	3,19	kJ/kg
Woutput	100,31	kJ/kg
Efic	17,1%	
Rejected heat	1607,2	kW
Regeneration	549,9	kW
Efect. Calc	0,256	
External Heat	2099,0	kW
Pump Power	11,8	kW
Turbine Power	371,1	kW
Net Power	359,3	kW
Inlet Exergy	1234,3	
Overall Exergy Efic	29,1%	



III.6.2 – R123

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	220,09	kJ/kg
Density	1476,95	kg/m³
Exergy	0,28	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	1600	kPa
Temperature	293,7	K
Entropy Isent	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	221,04	kJ/kg
Entropy	1,07	kJ/kg-K
Enthalpy	221,09	kJ/kg
Density	1479,48	kg/m³
Exergy	1,23	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	1520	kPa
Temperature Regen	325,35	K
Entropy Sat	1,42	kJ/kg-K
Entropy	1,18	
Enthalpy	252,72	kJ/kg
Exergy	1,04	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	1444	kPa
Temperature	453,09	K
Entropy	1,81	kJ/kg-K
Enthalpy	501,97	kJ/kg
Exergy	59,65	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	395,09	K
Entropy Isent	1,81	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	460,69	kJ/kg
Entropy	1,83	kJ/kg-K
Enthalpy	466,88	kJ/kg
Exergy	19,79	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

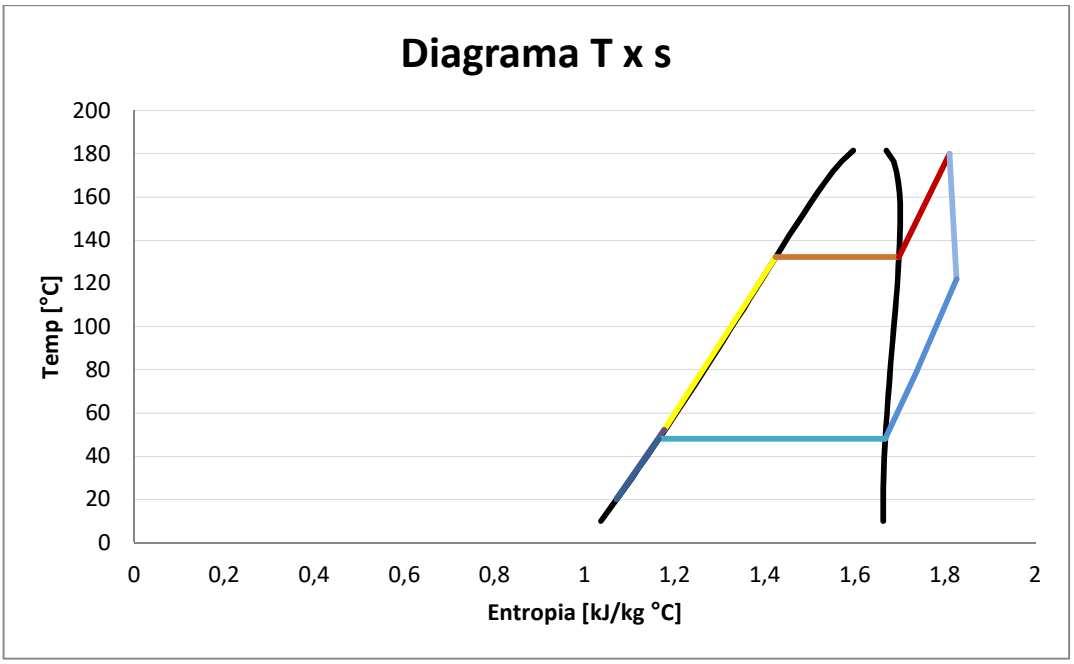
Pressure	200	kPa
Temperature	352,20	°C
Entropy	1,74	kJ/kg-K
Enthalpy	433,59	kJ/kg
Exergy	13,35	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	1525,15
Evap Flue Side	-924,85
Evaporator	600,30
Turbine	38,14
Cond Fluid Side	-1603,43
Cond Water Side	1701,19
Condenser	97,77
Reg Cold Side	254,5288
Reg Hot Side	-214,8
Regenerator	39,72888
Pump	0,41
Total Destruction	776,34
Exergy in Flue	1234,286

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	213,50	kJ/kg
Wpump	1,00	kJ/kg
Woutput	35,09	kJ/kg
Efic	13,0%	
Rejected heat	1708,0	kW
Regeneration	266,3	kW
Efect. Calc	0,135	
External Heat	2099,0	kW
Pump Power	8,0	kW
Turbine Power	280,7	kW
Net Power	272,7	kW
Inlet Exergy	1234,3	
Overall Exergy Efic	22,1%	



III.6.3 – Pentano

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	313,15	K
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	9,43	kJ/kg
Density	605,82	kg/m³
Exergy	0,71	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2400	kPa
Temperature	314,0	K
Entropy Isent	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	13,06	kJ/kg
Entropy	0,03	kJ/kg-K
Enthalpy	13,25	kJ/kg
Density	608,18	kg/m³
Exergy	4,34	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2280	kPa
Temperature Regen	364,64	K
Entropy Sat	1,01	kJ/kg-K
Entropy	0,41	
Enthalpy	139,38	kJ/kg
Exergy	17,41	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2166	kPa
Temperature	468,41	K
Entropy	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy	637,89	kJ/kg
Exergy	163,18	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	408,32	K
Entropy Isent	1,58	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	533,54	kJ/kg
Entropy	1,62	kJ/kg-K
Enthalpy	549,20	kJ/kg
Exergy	62,84	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

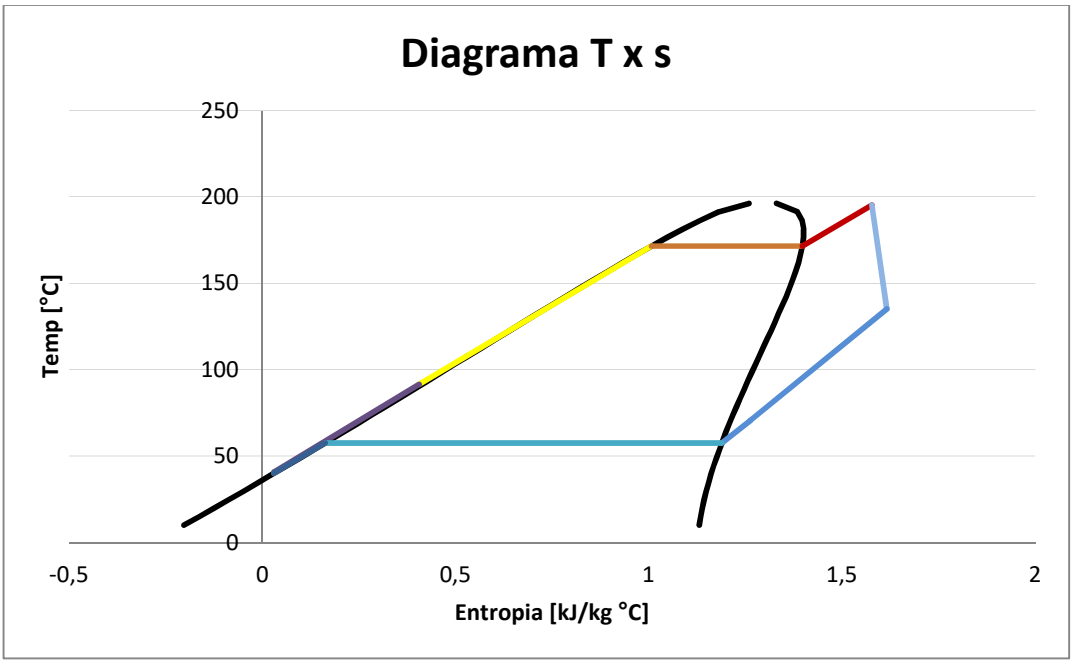
Pressure	200	kPa
Temperature	343,73	°C
Entropy	1,26	kJ/kg-K
Enthalpy	416,43	kJ/kg
Exergy	36,48	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	1410,95
Evap Flue Side	-924,85
Evaporator	486,10
Turbine	46,59
Cond Fluid Side	-1484,88
Cond Water Side	1621,80
Condenser	136,93
Reg Cold Side	452,2507
Reg Hot Side	-425,643
Regenerator	26,60804
Pump	0,73
Total Destruction	696,95
Exergy in Flue	1234,286

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	406,99	kJ/kg
Wpump	3,81	kJ/kg
Woutput	88,69	kJ/kg
Efic	16,2%	
Rejected heat	1628,0	kW
Regeneration	531,1	kW
Efect. Calc	0,248	
External Heat	2099,0	kW
Pump Power	15,3	kW
Turbine Power	354,8	kW
Net Power	339,5	kW
Inlet Exergy	1234,3	
Overall Exergy Efic	27,5%	



III.6.4 – R245fa

Stage 1 - After Condenser

Pressure	200	kPa
Temperature	293,15	K
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	225,89	kJ/kg
Density	1352,24	kg/m³
Exergy	8,86	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 2 - After Pump

Pressure	2600	kPa
Temperature	294,0	K
Entropy Isent	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	227,66	kJ/kg
Entropy	1,09	kJ/kg-K
Enthalpy	227,75	kJ/kg
Density	1356,99	kg/m³
Exergy	10,63	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 3 - After Regenerator

Pressure	2470	kPa
Temperature Regen	325,89	K
Entropy Sat	1,57	kJ/kg-K
Entropy	1,23	
Enthalpy	269,47	kJ/kg
Exergy	10,72	kJ/kg
Quality	#Subcooled liquid	

Stage 4 - After Heaters

Pressure	2346,5	kPa
Temperature	422,37	K
Entropy	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy	518,73	kJ/kg
Exergy	65,63	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 5 - After Turbine

Pressure	200	kPa
Temperature	354,08	K
Entropy Isent	1,87	kJ/kg-K
Enthalpy Isent	468,11	kJ/kg
Entropy	1,90	kJ/kg-K
Enthalpy	475,70	kJ/kg
Exergy	16,08	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Stage 6 - After Regenerator (other side)

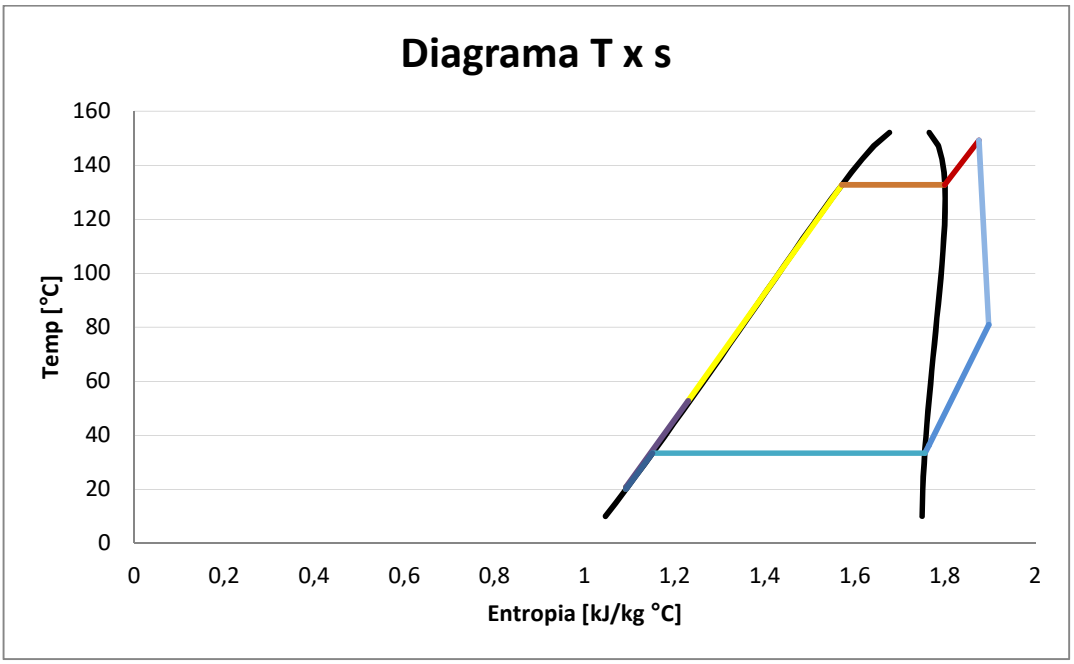
Pressure	200	kPa
Temperature	309,46	°C
Entropy	1,76	kJ/kg-K
Enthalpy	431,79	kJ/kg
Exergy	12,07	kJ/kg
Quality	#Superheated vapor	

Exergy Destruction Calculations

Evap Fluid Side	1554,80
Evap Flue Side	-924,85
Evaporator	629,95
Turbine	52,22
Cond Fluid Side	-1621,44
Cond Water Side	1685,49
Condenser	64,05
Reg Cold Side	332,9606
Reg Hot Side	-319,309
Regenerator	13,65121
Pump	0,76
Total Destruction	760,63
Exergy in Flue	1234,286

Energy Balance Calculations

Cond. Heat Output	205,90	kJ/kg
Wpump	1,86	kJ/kg
Woutput	43,02	kJ/kg
Efic	15,7%	
Rejected heat	1647,2	kW
Regeneration	351,3	kW
Efect. Calc	0,177	
External Heat	2099,0	kW
Pump Power	14,9	kW
Turbine Power	344,2	kW
Net Power	329,3	kW
Inlet Exergy	1234,3	
Overall Exergy Efic	26,7%	



APÊNDICE IV – Análise de Sensibilidade – Preço da Eletricidade e Custo de Investimento

IV.1 – Química

TABELA 128 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR QUÍMICA

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
8,28	5,44%	7,86%	10,10%	12,22%	14,26%	16,23%	18,15%	20,04%	21,90%	23,73%	25,55%	27,35%	29,14%	30,93%	32,71%
9,28	4,11%	6,38%	8,48%	10,45%	12,34%	14,16%	15,92%	17,64%	19,34%	21,00%	22,65%	24,28%	25,90%	27,51%	29,11%
10,28	2,98%	5,13%	7,12%	8,97%	10,74%	12,43%	14,07%	15,67%	17,23%	18,77%	20,28%	21,78%	23,26%	24,72%	26,18%
11,28	1,99%	4,06%	5,95%	7,71%	9,37%	10,97%	12,51%	14,00%	15,46%	16,89%	18,30%	19,68%	21,05%	22,41%	23,75%
12,28	1,13%	3,12%	4,93%	6,61%	8,19%	9,71%	11,16%	12,57%	13,95%	15,29%	16,60%	17,90%	19,18%	20,44%	21,69%

TABELA 129 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK QUÍMICA

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
8,28	13	10	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4
9,28	14	12	10	9	8	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4
10,28	15	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4
11,28	17	14	12	11	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5
12,28	18	15	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5

IV.2 – Cimento

TABELA 130 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR CIMENTO

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
10,09	5,95%	8,42%	10,72%	12,91%	15,00%	17,04%	19,03%	20,98%	22,90%	24,80%	26,69%	28,56%	30,42%	32,28%	34,13%
11,09	4,82%	7,16%	9,34%	11,39%	13,35%	15,25%	17,10%	18,91%	20,68%	22,44%	24,17%	25,90%	27,60%	29,30%	31,00%
12,09	3,83%	6,07%	8,14%	10,08%	11,94%	13,72%	15,46%	17,15%	18,81%	20,44%	22,05%	23,65%	25,23%	26,80%	28,37%
13,09	2,95%	5,11%	7,09%	8,94%	10,71%	12,40%	14,04%	15,63%	17,19%	18,72%	20,23%	21,73%	23,20%	24,67%	26,12%
14,09	2,17%	4,25%	6,16%	7,94%	9,62%	11,23%	12,79%	14,30%	15,78%	17,23%	18,65%	20,06%	21,44%	22,82%	24,18%

TABELA 131 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK CIMENTO

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
10,09	12	10	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	4	4	3
11,09	13	11	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4
12,09	14	12	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4
13,09	15	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4
14,09	17	14	12	10	9	8	8	7	6	6	6	5	5	5	5

IV.3 – Alumínio

TABELA 132 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR ALUMÍNIO

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
4,41	10,49%	13,53%	16,41%	19,20%	21,92%	24,58%	27,22%	29,83%	32,42%	35,01%	37,58%	40,15%	42,71%	45,27%	47,82%
5,41	7,61%	10,28%	12,79%	15,18%	17,48%	19,74%	21,95%	24,12%	26,28%	28,41%	30,54%	32,65%	34,75%	36,85%	38,95%
6,41	5,48%	7,89%	10,14%	12,27%	14,31%	16,29%	18,21%	20,10%	21,97%	23,81%	25,63%	27,44%	29,23%	31,02%	32,80%
7,41	3,79%	6,03%	8,10%	10,04%	11,89%	13,67%	15,40%	17,09%	18,74%	20,37%	21,98%	23,57%	25,15%	26,72%	28,28%
8,41	2,42%	4,52%	6,45%	8,25%	9,96%	11,60%	13,18%	14,72%	16,22%	17,69%	19,14%	20,58%	21,99%	23,40%	24,79%

TABELA 133 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK ALUMÍNIO

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
4,41	13	10	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4
5,41	14	12	10	9	8	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4
6,41	15	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4
7,41	17	14	12	11	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5
8,41	18	15	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5

IV.4 – Siderurgia

TABELA 134 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR SIDERURGIA

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
9,34	5,83%	8,28%	10,56%	12,72%	14,79%	16,80%	18,77%	20,70%	22,60%	24,47%	26,34%	28,18%	30,02%	31,85%	33,68%
10,34	4,62%	6,94%	9,08%	11,10%	13,04%	14,90%	16,72%	18,50%	20,24%	21,97%	23,67%	25,36%	27,03%	28,70%	30,36%
11,34	3,57%	5,78%	7,81%	9,73%	11,54%	13,30%	14,99%	16,65%	18,27%	19,87%	21,45%	23,00%	24,55%	26,08%	27,61%
12,34	2,65%	4,77%	6,71%	8,53%	10,26%	11,91%	13,51%	15,07%	16,59%	18,08%	19,56%	21,01%	22,44%	23,87%	25,28%
13,34	1,84%	3,88%	5,75%	7,49%	9,13%	10,71%	12,22%	13,70%	15,13%	16,54%	17,92%	19,29%	20,63%	21,97%	23,29%

TABELA 135 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK SIDERURGIA

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
9,34	12	10	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3
10,34	13	11	10	8	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4
11,34	15	12	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4	4
12,34	16	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4
13,34	17	14	12	11	10	9	8	7	7	6	6	6	5	5	5

IV.5 – Vidros

TABELA 136 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR VIDROS

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
9,87	7,23%	9,86%	12,31%	14,65%	16,91%	19,11%	21,27%	23,39%	25,49%	27,57%	29,64%	31,70%	33,74%	35,78%	37,82%
10,87	6,01%	8,49%	10,80%	12,99%	15,10%	17,14%	19,13%	21,09%	23,03%	24,94%	26,83%	28,71%	30,58%	32,45%	34,30%
11,87	4,95%	7,31%	9,50%	11,57%	13,55%	15,46%	17,33%	19,15%	20,95%	22,72%	24,47%	26,21%	27,94%	29,66%	31,37%
12,87	4,02%	6,28%	8,37%	10,34%	12,21%	14,02%	15,77%	17,49%	19,17%	20,82%	22,46%	24,08%	25,69%	27,28%	28,87%
13,87	3,19%	5,37%	7,37%	9,25%	11,04%	12,75%	14,42%	16,04%	17,62%	19,18%	20,72%	22,24%	23,74%	25,24%	26,72%

TABELA 137 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK VIDROS

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
9,87	11	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3	3
10,87	12	10	9	8	7	6	6	5	5	4	4	4	4	4	3
11,87	13	11	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4
12,87	14	12	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	4	4	4
13,87	15	13	11	9	8	8	7	6	6	6	5	5	5	4	4

IV.6 – Cerâmica – Caso A

TABELA 138 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - TIR CERÂMICA CASO A

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
1,03	5,29%	7,78%	10,09%	12,27%	14,36%	16,38%	18,35%	20,29%	22,19%	24,07%	25,94%	27,79%	29,63%	31,46%	33,28%
1,33	2,42%	4,61%	6,60%	8,47%	10,24%	11,93%	13,56%	15,15%	16,71%	18,23%	19,74%	21,22%	22,69%	24,14%	25,59%
1,63	0,37%	2,36%	4,17%	5,84%	7,41%	8,90%	10,33%	11,71%	13,05%	14,37%	15,65%	16,91%	18,16%	19,39%	20,60%
1,93	-1,21%	0,65%	2,32%	3,86%	5,29%	6,65%	7,95%	9,19%	10,39%	11,56%	12,70%	13,82%	14,91%	15,99%	17,05%
2,23	-2,49%	-0,73%	0,85%	2,29%	3,63%	4,89%	6,09%	7,23%	8,33%	9,40%	10,44%	11,45%	12,44%	13,41%	14,37%

TABELA 139 - RESULTADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - PAYBACK CERÂMICA CASO A

Investimento	Energia [R$/MWh]														
M USD	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
1,03	13	10	9	8	7	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3
1,33	16	13	11	10	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	4
1,63	20	16	14	12	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	5
1,93	0	19	16	14	13	11	10	10	9	8	8	7	7	6	6
2,23	0	0	19	16	15	13	12	11	10	9	9	8	8	7	7