

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO CALOR  
RESIDUAL EM MOTORES DE COMBUSTÃO  
INTERNA USANDO O ORC**

Autor: **Rieder de Oliveira Neto**

Itajubá, Janeiro 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Rieder de Oliveira Neto**

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DO  
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO CALOR  
RESIDUAL EM MOTORES DE COMBUSTÃO  
INTERNA USANDO O ORC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Christian J. R. Coronado

Co-Orientador: Dr. César Adolfo Rodriguez Sotomonte

Área de Concentração: **Conversão de Energia**

Itajubá, M.G. – Brasil

## Resumo

**OLIVEIRA NETO R. (2016).** Análise técnica e econômica do aproveitamento energético do calor residual em motores de combustão interna usando o ORC. Itajubá, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Neste trabalho de dissertação, fez-se uma pesquisa sobre o potencial de aproveitamento energético em um motor que utiliza um tipo de combustível fóssil (diesel). Foi realizado um estudo de caso, através de simulações no software HYSYS versão 8.6 da ASPENtech<sup>®</sup>, sobre o aproveitamento energético do calor descartado nos gases de exaustão de um motor de combustão interna (MCI). Foi realizado um estudo técnico-econômico com o objetivo de aumentar a eficiência na produção de energia elétrica e, assim, diminuir o consumo de combustível e as emissões de poluentes. Para tal, duas configurações de ORC (*Organic Rankine Cycle*) foram sugeridas, uma com o suprimento da água de condensação feito diretamente pela rede urbana de distribuição de água e a outra com um sistema de resfriamento para essa água, este último visa à implantação da planta ORC em locais onde há escassez ou dificuldade em obter água. Ambos os sistemas simulados conseguiram aumentar em até, aproximadamente, 20% a produção de eletricidade, com uma produção ligeiramente maior de energia pelo sistema que usa água da rede urbana. A análise econômica inclui um modelo econômico baseado no CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) e mostrou que o retorno financeiro na implantação do sistema ORC pode acontecer em no mínimo seis anos e três meses. Assim, conclui-se que o sistema ORC pode ser instalado em qualquer região, sem que haja muitas perdas em seu rendimento, e é uma solução adequada, tecnologicamente, para aproveitar o calor rejeitado nos gases de escape de um MCI, mas que ainda necessita de incentivos dos governos para que seja amplamente aplicada.

**Palavras-chave:** Ciclo Rankine Orgânico, gás de exaustão, motor de combustão interna, análise técnica, análise econômica.

## **Abstract**

**OLIVEIRA NETO R. (2016).** Technical and economic analysis of harnessing energy of waste heat from internal combustion engines using an ORC. Itajubá, Dissertation of Masters in Mechanical Engineering – Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

In this dissertation, there was a survey of the energy utilization potential of a fossil fuel type (diesel). A case study was realized, by simulation in the HYSYS version 8.6 software of ASPEN<sup>®</sup>tech, about the use of heat energy disposed in the internal combustion engine (ICE) exhaust gases. A techno-economic study was conducted in order to increase the electricity production efficiency and, thus, reduce fuel consumption and pollutants emissions. To do this, two sets of ORC (Organic Rankine Cycle) was suggested, one with the condensation water supply made directly by the urban water distribution network and another with a cooling system for this water, this latter aims to implement the ORC plant in places where there is scarcity or difficulty obtaining water. Both simulated systems increased in about 20% the production of electricity, in certain cases, the system that uses water from the urban network produced slightly more energy. The economic analysis used the CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) based economic model and showed that the financial return in the implementation of the ORC system can happen in six years and three months. Thus, it is concluded the ORC system can be installed at any region, without much loss in their performance, and it is an adequate technological solution to take advantage of the heat rejected in the exhaust gas of an ICE, but it needs more governmental efforts to make this system widely applied.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle, exhaust gas, internal combustion engine, technical analysis, economic analysis.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>10</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1    Objetivos.....	15
1.2    Desenvolvimento do trabalho .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1    Ciclo Rankine Orgânico.....	17
2.2    Principais Fontes de Calor para ORC .....	20
2.2.1    Energia Geotérmica .....	20
2.2.2    Energia Solar .....	22
2.2.3    Energia Térmica dos Oceanos (OTEC).....	24
2.2.4    Biomassa.....	25
2.2.5    Recuperação de Calor Rejeitado.....	27
2.3    Fluidos de Trabalho .....	29
2.4    Cálculo de eficiência do ORC .....	32
2.4.1    Eficiência de Primeira Lei .....	32
2.4.2    Eficiência de Segunda Lei .....	34
<b>3 ESTADO DE PESQUISAS DO ORC NO BRASIL E POTENCIAL ENERGÉTICO DA RECUPERAÇÃO DE CALOR EM MCI.....</b>	<b>37</b>
3.1    ORC no Brasil.....	37
3.2    Avaliação do desempenho do ORC que utiliza a recuperação de calor residual de um MCI como fonte de calor .....	39
<b>4 ANÁLISE TÉCNICA .....</b>	<b>45</b>
4.1    Motor e sistema ORC analisado .....	45
4.1.1    Motor .....	45
4.1.2    ORC ( <i>Organic Rankine Cycle</i> ).....	46
4.2    Fluidos orgânicos utilizados .....	48
4.3    ASPEN <sup>®</sup> tech HYSYS .....	50

4.4	Características da simulação .....	50
4.5	Resultados e discussão .....	51
4.5.1	Potência líquida produzida .....	52
4.5.2	Eficiência da Primeira Lei .....	54
4.5.3	Irreversibilidades .....	54
4.5.4	Eficiência de Segunda Lei .....	55
4.5.5	Vazão da água de condensação .....	56
<b>5</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>60</b>
5.1	CEPCI – <i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i> .....	60
5.2	Simulação.....	61
5.2.1	Custo de investimento .....	62
5.2.2	Custo da eletricidade produzida (EPC – <i>Electricity Production Cost</i> ) .....	66
5.2.3	Tempo de retorno do investimento – <i>Payback</i> .....	66
5.3	Exemplo de cálculos .....	67
5.4	Resultados e discussão.....	70
5.4.1	Configuração do sistema ORC sem torre de resfriamento .....	70
5.4.2	Configuração do sistema ORC com torre de resfriamento.....	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>95</b>
	Sugestões para trabalhos futuros .....	97
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução do mercado das plantas ORC no mundo (Quoilin, 2013). .....	18
Figura 2.2 – Percentual de uso das mais comuns fontes de calor para o ORC (Quoilin, 2013). .....	20
Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de uma planta de produção elétrica que usa energia geotérmica como fonte de calor (Tchanche, 2011). .....	22
Figura 2.4 – Planta de geração elétrica à energia solar, do tipo ORC modular (Tchanche, 2011). .....	23
Figura 2.5 – Sistema OTEC para geração elétrica (Tchanche, 2011). .....	24
Figura 2.6 – Processo de utilização da biomassa como fonte de calor em ORC para produção de energias elétrica e térmica, por meio de queima direta (Veléz, 2012a). .....	27
Figura 2.7 – Esquema de uma planta com ORC para recuperação do calor desperdiçado em processos industriais para produção de eletricidade e energia térmica (Veléz, 2012a). .....	29
Figura 2.8 – Classificação dos fluidos de trabalho, úmidos (a), isentrópicos (b) e secos (c) (Bao, 2013). .....	30
Figura 2.9 – Gráfico T-s do ORC em funcionamento (Roy, 2010 - modificada). .....	33
Figura 2.10 – Gráfico T-s do ORC em funcionamento com a reta T-s do fluxo de combustível (Roy, 2010 - modificada). .....	35
Figura 3.1 – Esquema do sistema ORC que utiliza a queima de gás pirolizado como fonte de calor (Vilela, 2014). .....	38
Figura 3.2 – Esquema de funcionamento do sistema integrado MCI a diesel – ORC duplo. Lembra-se que o motor a gasolina segue o mesmo esquema, porém, sem o equipamento de intercooler (Yang, 2014). .....	41
Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do ciclo combinado diesel – MCI simulado por Tian (2012) (Tian, 2012). .....	42
Figura 3.4 – Esquema de funcionamento do ciclo combinado diesel – ORC para recuperação do calor da água de refrigeração das jaquetas do MCI (Peris, 2013). .....	43
Figura 3.5 – Resultados das simulações para as diferentes configurações de ORC e diferentes fluidos de trabalho, no que se diz respeito à produção de eletricidade (Peris, 2013). .....	43
Figura 4.1 – Motor CATERPILLAR C32 ATAAC (Manual CATERPILLAR <sup>®</sup> , 2008). .....	45
Figura 4.2 – Esboço do sistema ORC analisado, (a) com alimentação do condensador pela água da rede e (b) com sistema de resfriamento da água de condensação. .....	47

Figura 4.3 – Expansão A-B onde há mistura de fases no dispositivo de expansão e expansão C, desejada para o sistema ORC em análise (Bao, 2013 - modificado).....	48
Figura 4.4 – Gráfico da energia líquida produzida pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.....	53
Figura 4.5 – Gráfico da energia líquida produzida pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.....	53
Figura 4.6 – Gráfico da eficiência de 1ª Lei pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.....	56
Figura 4.7 – Gráfico da eficiência de 1ª Lei pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.....	57
Figura 4.8 – Gráfico das irreversibilidades dos equipamentos pela pressão de evaporação dos sistemas ORC. ....	57
Figura 4.9 – Gráfico da eficiência de Segunda Lei pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.....	58
Figura 4.10 – Gráfico da eficiência de Segunda Lei pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.....	58
Figura 4.11 – Gráfico das vazões de água de condensação pela pressão de evaporação dos sistemas ORC. ....	59
Figura 5.1 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	73
Figura 5.2 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	74
Figura 5.3 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	75
Figura 5.4 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	76
Figura 5.5 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	77
Figura 5.6 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	78
Figura 5.7 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	79

Figura 5.8 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	80
Figura 5.9 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	81
Figura 5.10 – Gráfico de comparação entre os <b>Payback</b> da <b>acetona</b> , do <b>octano</b> e do <b>tolueno</b> para $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ e $i = 12\%$ , (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	82
Figura 5.11 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	85
Figura 5.12 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	86
Figura 5.13 – Gráfico do <b>EPC</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	87
Figura 5.14 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	88
Figura 5.15 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	89
Figura 5.16 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.	90
Figura 5.17 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>acetona</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	91
Figura 5.18 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>octano</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	92
Figura 5.19 – Gráfico do <b>Payback</b> com <b>tolueno</b> como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	93
Figura 5.20 – Gráfico de comparação entre os <b>Payback</b> da <b>acetona</b> , do <b>octano</b> e do <b>tolueno</b> para $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ e $i = 12\%$ , (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação dos diferentes tipos de plantas de geração elétrica a partir da energia geotérmica Tabela (Tchanche, 2011).....	21
Tabela 2.2 – Alguns tipos de fontes de energia a ser recuperada com o uso do ORC (Tchanche, 2011).....	28
Tabela 4.1 – Características do MCI utilizados como referência para o presente trabalho. ....	45
Tabela 4.2 – Características do gás de exaustão do MCI utilizado como referência para o presente trabalho (operação a 100% da carga). ....	46
Tabela 4.3 – Características do gás de exaustão do MCI utilizado como referência para o presente trabalho (operação a 100% da carga). ....	46
Tabela 4.4 – Parâmetros e modelos de cada equipamento dos sistemas simulados.....	48
Tabela 4.5 – Fluidos de trabalho para o sistema ORC analisado no presente trabalho, com seus respectivos limites de temperatura e pressão (Bao, 2013).....	49
Tabela 4.6 – Características e considerações principais feitas para análise técnica do sistema ORC no presente trabalho.....	51
Tabela 5.1 – Coeficientes “K’s” referentes ao tamanho ou capacidade e ao tipo de equipamento (Turton, 2008).....	63
Tabela 5.2 – Materiais para fabricação de cada equipamento (Turton, 2008). ....	64
Tabela 5.3 – Coeficientes e constantes necessários para o cálculo dos parâmetros “F <sub>P</sub> ” e “F <sub>BM</sub> ”, tanto dos trocadores de calor quanto das bombas (Turton, 2008). ....	65
Tabela 5.4 – Parâmetro “F <sub>BM</sub> ” para a turbina, evaporador e torre de resfriamento (Turton, 2008).....	66
Tabela 5.5 – Parâmetro “F <sub>BM</sub> ” para a turbina, evaporador e torre de resfriamento (Turton, 2008).....	67
Tabela 5.6 – Custo de investimento da planta ORC analisada sem torre de resfriamento. ....	72
Tabela 5.7 – Custo de investimento da planta ORC analisada com torre de resfriamento. ....	84

# SIMBOLOGIA

## Símbolos

$\dot{m}$	<i>Vazão de massa [kg/s]</i>
$A$	<i>Anuidade</i>
$B$	<i>Constante referente ao tipo de equipamento ou dispositivo</i>
$C$	<i>Custo de investimento / Constante de classificação do equipamento quanto à pressão</i>
<i>Custo</i>	<i>Custo de investimento total real</i>
$\dot{E}$	<i>Energia [W]</i>
$e$	<i>Exergia específica [J/kg]</i>
$F$	<i>Fator</i>
$f$	<i>Fator de custo com operação, manutenção e seguro de instalação</i>
$G$	<i>Ganho financeiro [R\$/kWh ou US\$/kWh]</i>
$h$	<i>Entalpia específica [J/kg]</i>
$H$	<i>Horas de funcionamento durante o ano [h/ano]</i>
$i$	<i>Taxa anual de juros</i>
$K$	<i>Constante da correlação entre equipamento e capacidade ou tamanho</i>
$P$	<i>Pressão [Pa]</i>
<i>Preço</i>	<i>Preço de venda da energia elétrica</i>
$Q$	<i>Quantidade de calor [J]</i>
$s$	<i>Entropia específica [J/(kg . K)]</i>
$T$	<i>Temperatura [K]</i>
$t$	<i>Tempo de operação da planta [anos]</i>
$\dot{W}$	<i>Potência [W]</i>

## Letras Gregas

$\Delta$	<i>Variação</i>
$\eta$	<i>Eficiência</i>

## Abreviaturas

<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>CEPCI</i>	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
<i>CHP</i>	<i>Combined Heat and Power</i>
<i>EPC</i>	<i>Electricity Production Cost</i>
<i>GWP</i>	<i>Global Warming Potential</i>
<i>HRS</i>	<i>Heat Recovery Steam Generator</i>
<i>MCI</i>	<i>Motores de Combustão Interna</i>
<i>NPSH</i>	<i>Net Positive Suction Head (Pressão de Sucção da Rede)</i>
<i>ODP</i>	<i>Ozone Depletion Potential</i>
<i>ORC</i>	<i>Organic Rankine Cycle (Ciclo Rankine Orgânico)</i>
<i>OTEC</i>	<i>Ocean Thermal Energy Conversion System</i>
<i>PPI</i>	<i>Producer Price Indexes</i>
<i>PRSV</i>	<i>Penge Robinson – Stryjeke – Vera</i>
<i>SPPP</i>	<i>Solar Pond Power Plant</i>

## Subscritos

<i>0</i>	<i>Referência</i>
<i>2001</i>	<i>Ano de 2001</i>
<i>a</i>	<i>Água de condensação</i>
<i>b</i>	<i>Bomba</i>
<i>BM</i>	<i>Módulo ou equipamento</i>
<i>cond</i>	<i>Condensador</i>

<i>e</i>	<i>entrada</i>
<i>evap</i>	<i>Evaporador</i>
<i>F</i>	<i>Física</i>
<i>f</i>	<i>Fluido de trabalho</i>
<i>gás</i>	<i>Gás de escape ou exaustão</i>
<i>I</i>	<i>Primeira Lei da Termodinâmica</i>
<i>II</i>	<i>Segunda Lei da Termodinâmica</i>
<i>liq</i>	<i>Líquida ou útil</i>
<i>M</i>	<i>Material</i>
<i>P</i>	<i>Pressão</i>
<i>p</i>	<i>Pressão ambiente</i>
<i>rev</i>	<i>Reversível</i>
<i>s</i>	<i>saída</i>
<i>Set/2014</i>	<i>Setembro de 2014</i>
<i>sup</i>	<i>Superaquecedor</i>
<i>t</i>	<i>Turbina</i>
<i>torre</i>	<i>Torre de resfriamento</i>
<i>total</i>	<i>Valor total</i>

## **Sobrescritos**

<i>0</i>	<i>Padrão</i>
----------	---------------

# 1 INTRODUÇÃO

Devido a crescente preocupação mundial com o nível de poluição do meio ambiente pelo uso de combustíveis fósseis, tem aumentado o número de pesquisas que visam desenvolver tecnologias alternativas a essa fonte de energia. Também, os pesquisadores tentam aumentar a eficiência energética dos equipamentos e processos para que o consumo dos combustíveis fósseis seja reduzido.

Aproveitar o calor que deixa as máquinas e processos dentro de uma indústria petroquímica, siderúrgica, automotiva ou alimentícia, por exemplo, é uma maneira de aumentar a eficiência energética que é muito utilizada nas empresas pelo mundo. Existem diversos sistemas capazes de captar essa energia residual de tais processos e transformá-la em um tipo de energia que possa ser aproveitada. O Ciclo Rankine Orgânico (ORC) é um desses possíveis sistemas de aproveitamento energético (Apostol, 2015).

O ORC absorve o calor proveniente de uma fonte e o transforma em energia elétrica e, em alguns casos, também em térmica. Composto, basicamente, por dois trocadores de calor (evaporador e condensador), uma bomba e uma turbina. Esse ciclo orgânico difere do Rankine convencional justamente pelo fato do fluido de trabalho ser um composto orgânico e não a água. Assim, pode ser aproveitado o calor residual de baixa ou média temperatura.

Alguns outros tipos de fontes de calor para aplicação do ORC, também de baixa e média temperatura, são: o calor proveniente da queima da biomassa, em alguns casos, e as energias geotérmica, solar e térmica dos oceanos. A diferença desses processos para o aproveitamento do calor residual dos equipamentos e processos indústrias é que, diferentemente desse último, na maior parte das aplicações, a planta ORC é o agente produtor de energia útil principal e não um ciclo auxiliar para aumentar a eficiência do sistema já existente.

O fluido orgânico a ser usado no sistema ORC deve ser escolhido de modo que seja capaz de produzir o máximo de energia preservando as características de projeto previamente estabelecidas (potencial de corrosividade, níveis de toxicidade e inflamabilidade, baixo custo, dimensionamento dos equipamentos do ciclo, etc). Por isso, nem sempre o fluido que produz mais energia é aquele escolhido pelos responsáveis do planejamento.

Segundo Yang (2015), os motores de combustão interna são máquinas de eficiência térmica muito baixa, algo em torno de 30%. Graças a isso e sua versatilidade de emprego, os MCI são responsáveis por aproximadamente 60% do consumo de petróleo no mundo. Esses aproximadamente, dois terços da energia do combustível são rejeitados pelo sistema de

resfriamento do motor, lubrificação, pela radiação e, principalmente, nos gases de escape do motor.

Aumentar a eficiência desses motores, no projeto, não é um trabalho muito simples, uma vez que seria altamente dispendioso em termos financeiros graças aos processos de fabricação e matérias a serem empregados. Assim, um dos melhores e mais usados métodos para aumentar essa eficiência é a instalação de uma planta ORC que capta essa energia residual e, depois, aproveitá-la para produção de energia útil.

O aumento na produção de energia elétrica em motores de combustão interna estacionários pode chegar a 50% quando em operação com cargas baixas (Wang, 2012). Em outras palavras, com o investimento na implantação de um sistema ORC o consumo de combustível para a mesma produção de energia é consideravelmente menor.

As grandes vantagens em implantar o ciclo Rankine orgânico são sua fácil manutenção e operação, a simplicidade nos componentes do sistema, a possibilidade de aplicação do ORC em vários tipos de sistema térmicos de potência e a promessa de preservação e ao meio ambiente com o uso desse ciclo.

Talvez o quadro econômico atual não viabilize financeiramente a maioria das aplicações de uma planta ORC, que leva de quatro a sete anos, na grande maioria dos casos, para se pagar. Mas o retorno em avanços tecnológico para preservação do meio ambiente bem como aumento da eficiência dos processos é inegável. Existem vários modelos econômicos que fornecem dados quantitativos para uma análise de viabilidade econômica na instalação de um planta ORC. O melhor e mais confiável método é ter disponível, exatamente, todos os custos com equipamentos, manutenção, mão de obra, instalação, em fim, tudo que for necessário para o funcionamento do sistema. Mas para uma análise estratégica às vezes um aproximação desses custos e despesas já é suficiente para saber em quanto tempo e qual vai ser o retorno que tal investimento forneceria.

Como exemplo, um método bastante usado e bem simples para esse tipo de análise é o modelo econômico baseado no CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*), que nada mais é que um cálculo econômico baseado em coeficientes estatísticos que representam os gastos na implantação de sistema e plantas químicas, como o ORC.

## 1.1 Objetivos

Realizar uma análise técnico-econômico, apresentar a faixa de investimento e retorno financeiro na possível implantação de uma das duas propostas de configuração para uma

planta ORC que recupera o calor rejeitado nos gases de exaustão de um motor de combustão interna estacionário a diesel.

Além disso, três objetivos específicos tiveram de ser cumpridos para que o objetivo principal fosse alcançado, são eles:

- I. Realizar simulações das plantas ORC no software ASPEN<sup>®</sup>tech<sup>®</sup> HYSYS v8.6 para diversos fluidos orgânicos que atuaram como fluidos de trabalho para tais sistemas, além de várias pressões de evaporação.
- II. Avaliar o desempenho do sistema ORC para ter a certeza que a sua implantação aumentaria significativamente a produção de eletricidade.
- III. Aplicar os resultados obtidos na análise técnica com as simulações no modelo econômico baseado no CEPCI.

## **1.2 Desenvolvimento do trabalho**

No Capítulo 1 é dada uma visão introdutória sobre o tema que o presente trabalho aborda, bem como os objetivos e a estruturação do mesmo.

O Capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica sobre o que abrange o tema “alternativas para produção de energia e uso do ORC”. Essa discussão continua no Capítulo 3, porém com foco maior no que se refere ao desempenho de vários sistemas baseados no ORC.

A análise técnica para o caso a ser estudado nesta dissertação foi apresentada no Capítulo 4, onde os dados obtidos ali são de suma importância para o objetivo do trabalho.

Com isso, no Capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos na análise econômica nos modelos ORC estudados para o caso de aproveitamento energético analisado. Por fim, o Capítulo 6 que trata das conclusões angariadas durante todo o desenvolvimento deste trabalho e das sugestões para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma breve explicação sobre o Ciclo Rankine Orgânico é dada neste capítulo, bem como suas diferenças com o Ciclo Rankine Convencional e como está o mercado em termos de projetos e plantas instaladas desse sistema ORC. Também são mostradas, rapidamente, algumas das possíveis fontes de calor para este ciclo orgânico, dentre elas a recuperação de calor de motores a combustão interna, que é o escopo do presente trabalho. O capítulo ainda apresenta uma explicação de quais são as características desejadas para o fluido de trabalho do ORC, bem como seus equipamentos (trocadores de calor, bomba e dispositivo de expansão). Além da formulação do cálculo para determinação das eficiências de Primeira e Segunda Leis.

### 2.1 Ciclo Rankine Orgânico

Devido a atual política de proteção ao meio ambiente, avanços tecnológicos para melhoria do aproveitamento energético estão em ascensão. Dentre as soluções para esse problema (Wei, 2007) o ORC é a mais utilizada. Isso, pois, possui baixos custo e necessidade de manutenção e altas flexibilidade de aplicação e segurança. Gases como dióxido de carbono e dióxido de enxofre podem ter suas emissões diminuídas com a implantação do ORC. Uma vez que, teoricamente, o ciclo não necessita de combustível adicional para a operação. Assim, há uma produção energética maior para a mesma quantidade de poluentes. Além disso, o calor de exaustão do ORC pode ser usado em centrais de refrigeração. O calor do ciclo é levado para o *chiller* de tais centrais onde lá evapora o fluido de refrigeração.

O ORC tem ganhado força a partir de sua primeira planta comercial, instalada nos anos 80. Tem como característica o uso de componentes que estão avançados, em termos tecnológicos, graças ao extenso uso destes em sistemas de refrigeração. Além de poder aproveitar várias fontes de calor apenas com a necessidade de pequenas adaptações. Desde então nota-se um crescimento exponencial na utilização deste sistema desde os anos 80 (Figura 2.1). Assim, como o Ciclo Rankine a vapor de água, o ORC, em sua forma mais simples, também utiliza quatro componentes (um evaporador, uma turbina, um condensador e uma bomba). A diferença é o fluido de trabalho, que é um composto orgânico em vez de água. Isso faz com que possa aproveitar o calor de fontes que estejam, também, a menores temperaturas (60 a 300 °C) e menores pressões. Em contrapartida a eficiência dos ciclos Rankine a vapor são maiores que as dos ORC (Quoilin, 2009, 2013).

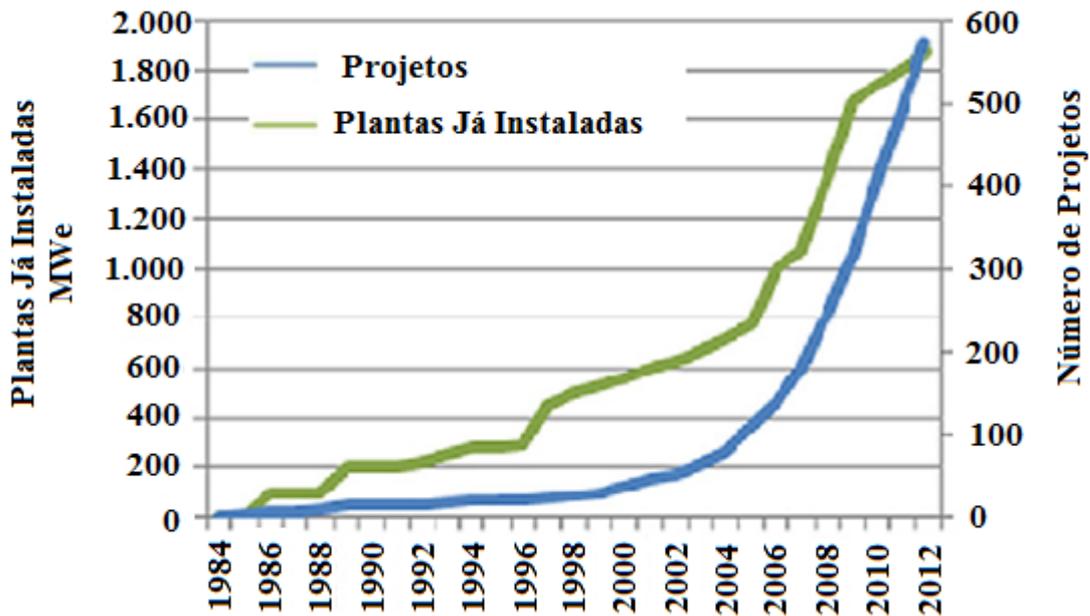


Figura 2.1 – Evolução do mercado das plantas ORC no mundo (Quoilin, 2013).

De acordo com Roy (2010), o ORC é considerado simples, pois a maior parte do fornecimento de calor ao ciclo, e também rejeição por parte do sistema, ocorre durante a mudança de fase do fluido de trabalho. Esse fluido é condensado, em um processo isotérmico, no condensador e segue para a bomba. Então sua pressão é elevada para chegar ao evaporador, onde o fluido é evaporado à pressão constante. Depois ele vai para a turbina onde é expandido e faz com que o dispositivo movimente um gerador elétrico acoplado ao sistema.

Enquanto o ORC utiliza um fluido orgânico de baixo ponto de evaporação, o Rankine usa a água para operar. O Ciclo Rankine Convencional está entre os melhores meios de produzir potência elétrica. Como, por exemplo, é visto em usinas nucleares. As principais vantagens desse ciclo sobre o ORC são:

- Boa estabilidade térmica e química;
- Baixa viscosidade;
- Altos calores latente e específico;
- Não é tóxico, inflamável ou prejudicial ao meio ambiente;
- Baixo custo.

Segundo Tchanche (2011), a tecnologia ORC vem sendo considerada a principal forma de converter calor de fontes de baixa temperatura em energia elétrica. Logo, as pesquisas neste campo aumentaram consideravelmente. As vantagens do ORC em relação ao Ciclo Rankine são:

- Temperaturas e pressões menores no evaporador;

- Não há necessidade de superaquecimento, uma vez que a expansão se dá na área de vapor;
- Perdas e razões de pressão menores, logo, menos estágios nas turbinas.

É necessário um superaquecimento da água para que esta não condense durante a expansão e, assim, não apresente: risco de erosão das pás da turbina e altas pressões no evaporador. Logo, este sistema é recomendado apenas para fontes de calor de altas temperaturas (Tchanche, 2011 e Branchini, 2013).

Os trocadores de calor são uma parte importante no custo do sistema ORC, por isso é importante o correto dimensionamento destes equipamentos. Existem dois principais tipos de trocadores utilizados neste tipo de ciclo: casco e tubo (usado para altas demandas de energia elétrica) e o do tipo plate (usado para baixas demandas de energia elétrica). A troca de calor pode ser feita de duas maneiras: em contato direto do fluido de trabalho e a fonte de calor e por contato indireto, por meio de um terceiro fluido. A bomba utilizada no ORC deve ser cuidadosamente dimensionada, pois deve atender com as necessidades do ciclo de: controlabilidade, eficiência e NPSH. Além do fluido de trabalho, que será abordado mais adiante no presente trabalho, a seleção adequada do dispositivo de expansão do ciclo também é bastante importante para aumento da eficiência do sistema (Quoilin, 2013). Eles podem ser de dois tipos:

- Turbomáquinas – Dispositivos de expansão utilizados quando a demanda de energia elétrica é alta, já que sua eficiência cai drasticamente quando o contrário acontece. São elas, principalmente, de dois tipos: turbinas axiais ou radiais. As turbinas axiais são usadas quando o fluido de trabalho possui grande peso molecular. Com este dispositivo um único estágio pode ser utilizado para produzir energia a partir de fontes de calor de baixas e médias temperaturas (Gomes, 2012). As turbinas radiais que são usadas nos casos onde ocorrem grande razões de pressão e baixas taxas de fluxo de fluido. Além de serem capazes de manter sua eficiência para uma maior faixa de cargas parciais (Pereiras, 2011).
- Deslocamento positivo – Esses sistemas de expansão são vistos quando a demanda de eletricidade é baixa. São eles, principalmente, de três tipos. Os a pistão, que intercalam os tempos de injeção e exaustão na câmara de expansão e são menos propícios a vazamentos (Quoilin, 2013). E, também, expansores dos tipos parafuso e voluta que, por serem rotativos, não necessitam de válvulas para os tempos de entrada e saída de fluido, o que é uma vantagem em termos construtivos (Lu, 2013).

## 2.2 Principais Fontes de Calor para ORC

Existem muitas possibilidades de fontes de calor para obtenção de energia a partir do ORC. Dentre elas, a Biomassa, energia solar e geotérmica, calor dos gases de exaustão dos motores de combustão interna, este último principalmente, pois é o escopo do presente trabalho de dissertação. Sendo a biomassa o recurso mais utilizado (Figura 2.2), seguido pela recuperação de calor (Quoilin, 2009,2013; Meinel, 2014a).

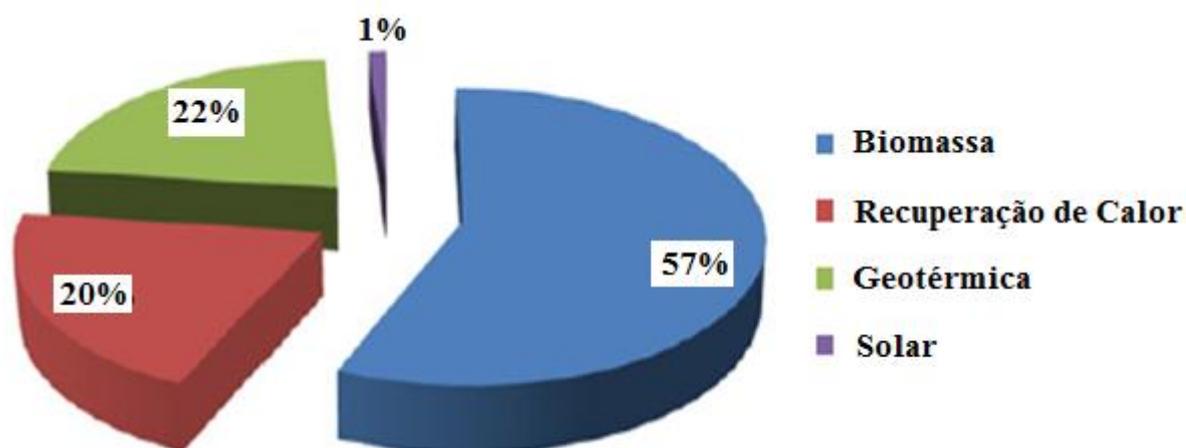


Figura 2.2 – Percentual de uso das mais comuns fontes de calor para o ORC (Quoilin, 2013).

A energia térmica dos oceanos também é utilizada como fonte de calor para o ORC e produção de energia elétrica. Água líquida, mistura de vapor e água líquida e vapor superaquecido proveniente do subsolo do planeta são as fontes de calor do processo (Hettiarachchi, 2007).

### 2.2.1 Energia Geotérmica

De acordo com Aneke (2011) a energia proveniente do calor gerado no centro da Terra, energia geotérmica, está presente nas camadas superiores do planeta, principalmente, em forma de vapor d'água, mistura de vapor e água quente ou mesmo apenas água quente. Com os avanços tecnológicos do ciclo binário ORC, plantas para produção de eletricidade a partir da energia geotérmica estão se desenvolvendo cada vez mais para aproveitar energia de baixas e médias temperaturas. As variações na temperatura da fonte ocasiona aumento ou diminuição na eficiência e produção energética do sistema, como mostrado no trabalho de Aneke (2011).

A Terra provém energia em forma de calor que parte do núcleo até a superfície. Essa energia diminui quanto mais longe do centro do planeta se está. O calor pode ser utilizado em processos de aquecimento e, também, de geração de energia elétrica. A energia que a Terra é capaz de fornecer, de acordo com Tchanche (2011), é cerca de três vezes maior que a necessária, por volta de 40 TW, para o consumo mundial. Mas ela está distribuída de maneira desigual nas proximidades da superfície, onde é possível, atualmente, fazer uso dela. A maioria das plantas ORC que produzem eletricidade a partir da energia geotérmica são de quatro tipos: vapor seco, *single-flash*, *double-flash* e de ciclo binário (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Comparação dos diferentes tipos de plantas de geração elétrica a partir da energia geotérmica Tabela (Tchanche, 2011).

<b>Tipo</b>	<b>Temperatura da fonte (°C)</b>
Ciclo Binário	125 – 165
Vapor Seco	180 – 300
<i>Double-Flash</i>	240 – 320
<i>Single-Flash</i>	200 – 260

As eficiências de Primeira e Segunda Leis para uma planta geotérmica são, relativamente, baixas, cerca de 5 – 15% e 20 – 54%, respectivamente (Tchanche, 2011). A otimização da planta é feita a partir desses dois parâmetros, ou seja, em outras palavras, energia e exergia. Para aumentar a eficiência das plantas geotérmicas, ciclos em regimes transcíticos têm sido estudados. Uma vez que não existe hoje um critério para otimizar esse tipo de sistema. Mas nesse regime existem dois grandes problemas, são eles: às altas pressões na linha que podem comprometer a segurança do sistema e a dificuldade na condensação do fluido, que possui baixo ponto de condensação.

Segundo Fiaschi (2014) em 2010 aproximadamente 11 GW de potência foram produzidos no mundo a partir da energia geotérmica. Essa produção energética foi tanto de caráter eletromecânico quanto térmico. Isso, pois as plantas de cogeração (CHP) para baixas e médias temperaturas a partir de energia geotérmica tem grande potencial em aproveitamento energético neste tipo de aplicação. Na maioria dos casos o sistema para esse tipo produção energética é feito por sistemas em série ou em paralelo, o que produz, além da energia elétrica, uma potência térmica de baixa temperatura ideal para utilização em sistemas tipicamente residenciais (aquecimento distrital) mas insuficiente para aplicação industrial (Fiaschi, 2014).

Como pode ser visto na

Figura 2.3, água quente é extraída da crosta terrestre e levada a dois trocadores de calor. Nesses equipamentos a água transfere calor ao fluido orgânico do sistema ORC, e faz com que este evapore. A água então é levada a um sumidouro, enquanto o fluido de trabalho completa o ciclo após passar pelo dispositivo de expansão, que produzirá a energia elétrica, depois pelo condensador e pela bomba, onde dará reinício ao processo novamente. Nota-se uma torre de resfriamento, nela a água quente do sistema de condensação é resfriada e, depois, retorna a esse mesmo trocador de calor.

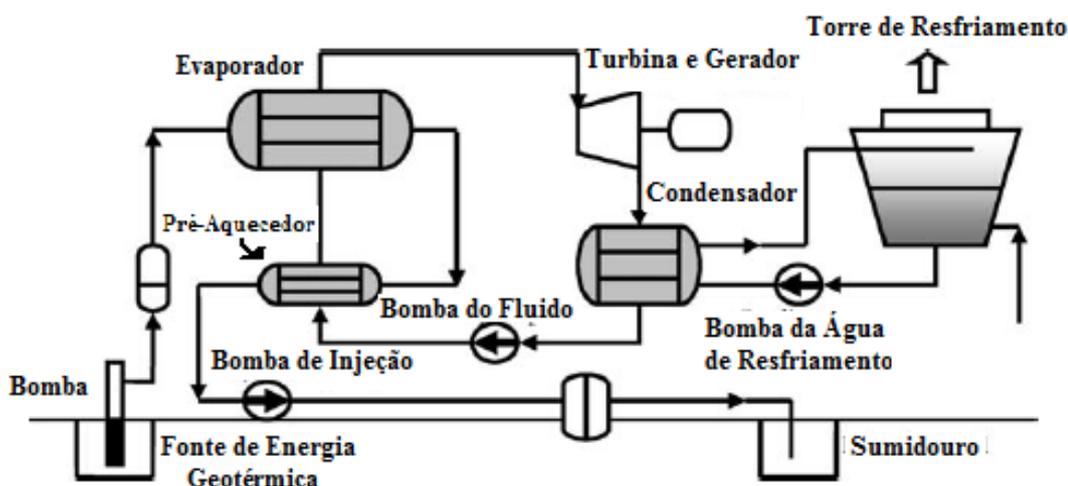


Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de uma planta de produção elétrica que usa energia geotérmica como fonte de calor (Tchanche, 2011).

A produção de eletricidade a partir de fontes de energia geotérmica tem crescido rapidamente desde 1979. Hoje é possível prever que em 2015 sejam produzidos por volta de 18,5 GW de potência a partir desse tipo fonte. Os principais ciclos utilizados para a captação do calor de baixa e média temperatura dessa fonte, como dito anteriormente, são o ORC e o Kalina. O ORC se destaca, pois possui as melhores eficiências de Primeira e Segunda Lei nos estudos realizados (Guzović, 2014).

### 2.2.2 Energia Solar

Pesquisas sobre o aproveitamento da energia solar, em instalações de ORC, geralmente, tratam de cogeração. Estas ganharam intensidade quando houve necessidade de levar energia para áreas distantes dos pontos de geração por meios convencionais (hidrelétricas e termoelétricas, por exemplo). Em 2005 o custo do investimento do painel fotovoltaico era de, aproximadamente, 7.000 €/kW (instalado), em 2014 esse custo girava em torno de apenas 2.000 €/kW. Essa tecnologia é, atualmente, a mais utilizada para distribuição de energia alternativa para uso residencial. Isso devido ao baixo custo em manutenção e

gestão do sistema, facilidade de instalação, padronização dos equipamentos e pela redução no preço dos painéis fotovoltaicos. A integração do sistema de geração de potência a partir da energia solar com o ORC, devido a incentivos fiscais, reduziu seu custo em cerca de 71,4%, na Europa (Villarini, 2014).

Uma solução para obtenção de energia limpa a partir da energia solar é o *Modular Organic Rankine Cycle Solar System* (Figura 2.4) ou simplesmente, ORC Modular. Tem como princípio de funcionamento o mesmo do convencional coletor parabólico, porém o fluido de trabalho é um composto orgânico e não água. O coletor parabólico recebe a energia solar e a transfere para o primeiro fluido, um óleo térmico por exemplo, que, então, transmite essa energia para o fluido orgânico do ORC, onde a eletricidade será produzida no sistema de expansão.

As principais vantagens do sistema quando utiliza o fluido orgânico são:

- Operação em baixas temperaturas para a fonte de calor. O que proporciona sua instalação em áreas com baixo índice de radiação solar;
- Sistema de montagem modular;
- Menor capital inicial de investimento assim como menores custos de montagem e operação.

Outras variações desse sistema são consideradas e alvo de estudos, como o sistema híbrido, que envolve outra fonte de energia, além da solar. Tchanche (2011) cita: o híbrido solar/gás e o mini-híbrido solar/diesel.

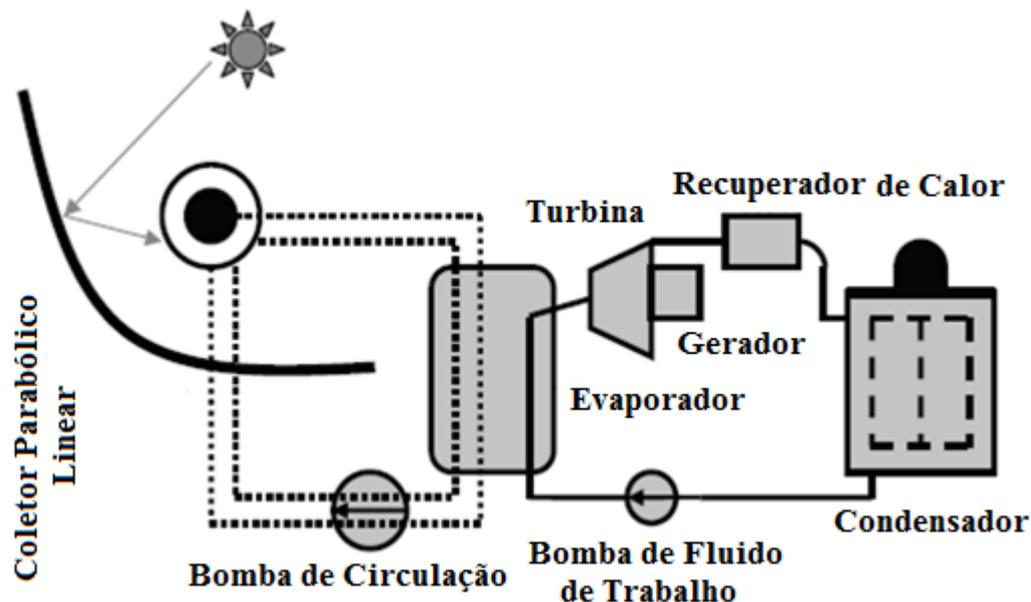


Figura 2.4 – Planta de geração elétrica à energia solar, do tipo ORC modular (Tchanche, 2011).

Ferrara (2014) realizaram estudos sobre plantas para produção elétrica de pequena escala a partir da energia solar concentrada e com uso do sistema ORC. Tais plantas fazem uso de espelhos para focar os raios solares em um ponto e, assim, aumentar a energia a ser captada. No trabalho, os autores analisaram a mesma planta para três diferentes fluidos de trabalho: R134a, R245fa e acetona. Os espelhos concentram a energia solar que era transferida a um óleo térmico e depois, no evaporador, entregue ao fluido orgânico do ORC onde houve a produção de potência (análogo ao mostrado pela Figura 2.4). Segundo as simulações feitas, o uso do regenerador, superaquecedor e pré-aquecedor juntamente com a acetona como fluido de trabalho foi à configuração mais satisfatória, com cerca de 20% de eficiência e uma produção elétrica de, aproximadamente, 20,96 kW.

### 2.2.3 Energia Térmica dos Oceanos (OTEC)

A maior parte do planeta é coberta pelos oceanos. É possível aproveitar a energia térmica proveniente dos mares para produção de eletricidade. O que faz desse sistema uma grande fonte de geração de energia limpa. O princípio de funcionamento do OTEC (Figura 2.5) é A água quente da superfície do oceano transfere energia para o fluido orgânico do ORC no evaporador. Esse fluido ao passar pelo sistema de expansão acoplado a um gerador produz eletricidade. Por fim, o fluido é condensado devido às baixas temperaturas de profundidades maiores no oceano e é bombeado de volta para o evaporador.

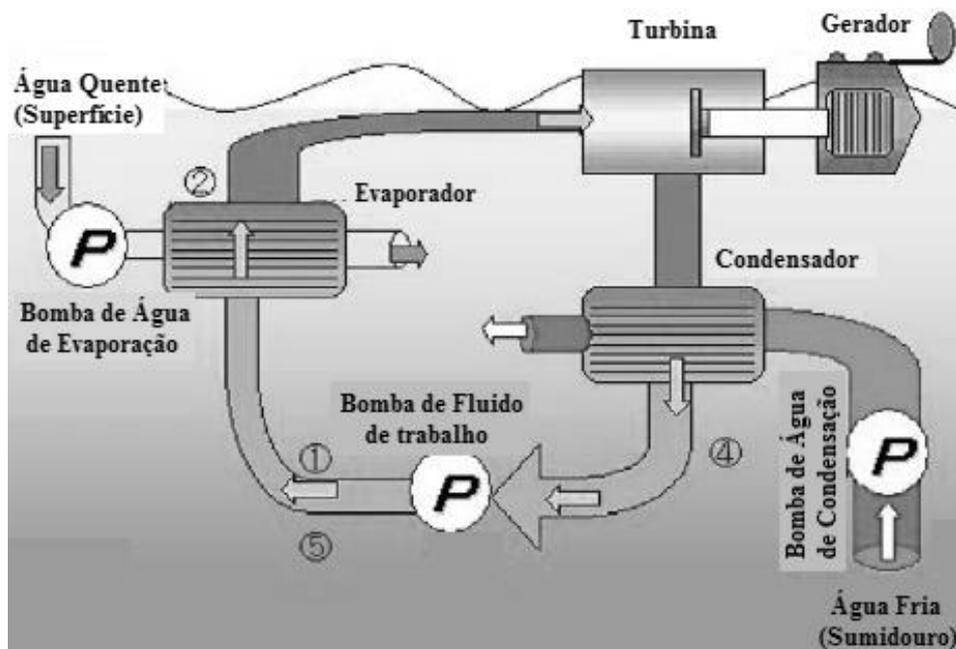


Figura 2.5 – Sistema OTEC para geração elétrica (Tchanche, 2011).

Segundo Sun (2014) o acidente nuclear de Fukushima, em Março de 2011, fez com que o respeito e investimento no aproveitamento do potencial energético dos oceanos (OTEC) crescessem. O sistema opera entre as temperaturas da superfície marítima (20 a 30°C) e a de águas mais profundas (3 a 10°C), logicamente, quanto menor for a diferença entre essas temperaturas menor o potencial de produção de energia. A tecnologia ORC é aconselhada para este tipo de fonte para recuperar calor de baixa temperatura. No trabalho desses autores ainda contém uma análise da performance desse tipo de planta. Com amônia como fluido de trabalho para o ORC pode-se produzir cerca de 2.750 kW de energia, que decai com a diminuição da vazão de água quente, bem como, da diferença de temperatura entre as fonte quente e o sumidouro do sistema (águas mais profundas). O mesmo acontece com a eficiência do sistema que poderia chegar até, aproximadamente, 4,6%.

Diferentes configurações de plantas OTEC podem ser encontradas, as mais comuns são as de ciclos fechado (ORC), aberto (Rankine) e híbrido. Esse tipo de sistema pode ser usado, também, para aumentar a eficiência de plantas termoelétricas a carvão ou nucleares, uma vez que estas podem utilizar a água do mar ou de rios para resfriar os reatores e devolver esta água ao oceano à baixas temperaturas o que não prejudica o meio ambiente (Soto, 2014).

#### **2.2.4 Biomassa**

A biomassa é geralmente utilizada em plantas de cogeração (CHP) que produzem tanto energia elétrica quanto térmica. Tais sistemas são classificados em grande (> 2.000 kW), média (200 a 2.000 kW), pequena (10 a 200 kW) e micro (1 a 10 kW) escala quanto ao nível de produção de eletricidade.

De acordo com Qiu (2012) a energia proveniente da queima de biomassa representa cerca de 14% das fontes de energia primárias do mundo, e chega a mais de 35% nos países emergentes. Este tipo de fonte é interessante, pois, mesmo com índices de emissão de CO<sub>2</sub> próximos aos dos combustíveis fósseis, a biomassa a ser plantada absorverá esse gás novamente da atmosfera, logo o efeito prejudicial do poluente, em relação ao meio ambiente, é “anulado”. Além disso, as emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> são desprezíveis, quando comparadas às liberadas na queima de combustíveis não renováveis.

Com a atenção da comunidade pesquisadora voltada ao ORC, pesquisas que visam o aumento da eficiência e diminuição nos custos desse ciclo estão cada vez mais em evidencia. Vários trabalhos são feitos no que se diz respeito à utilização dos recuperadores de calor e dos

superaquecedores no Ciclo Rankine Orgânico a partir da biomassa como fonte de energia (Algieri, 2014).

Em Rentizelas (2009) é mostrado que os tipos de biomassa mais comuns são os resíduos agrícolas. Por isso sua disponibilidade é afetada pela sazonalidade das culturas. Também para o ORC com biomassa como fonte de calor, a escolha do fluido de trabalho se faz importante. Pois é ela que determinará a eficiência do processo. A escolha de uma planta ORC tendo como fonte de calor a combustão de biomassa, em comparação a gaseificação da mesma, apresenta menores custos iniciais e com operação e manutenção. O ORC tem seus componentes padronizados e prontos para montagem do ciclo, por isso, também, é mais utilizado que o processo de gaseificação. Graças a isso, o tempo e os custos de instalação são baixos.

A queima de biomassa como fonte de calor para o ORC tem como características principais à baixa densidade de energia e o local da demanda de calor e eletricidade ser próximo de onde é extraído o recurso. Assim, para diminuir os custos com transporte e redes de distribuição de energia, a planta desse sistema é construída próxima ao lugar de utilização (Quoilin, 2009).

Pode-se notar pela Figura 2.6 que a biomassa é queimada no forno e os gases dessa queima promovem a evaporação do fluido orgânico do ORC que ao passar pelo sistema de expansão produz eletricidade. Neste exemplo de utilização do ORC para produzir energia elétrica nota-se duas peculiaridades, o ar de entrada é pré-aquecido com os gases de exaustão do forno o que aumenta a eficiência do sistema, uma vez que menos combustível é necessário para o processo. A segunda é o aproveitamento do calor residual do condensador para produção de água quente ou até mesmo vapor a ser utilizado em alguns processos industriais, o que caracteriza um sistema de cogeração.

Segundo Veléz (2012a), a biomassa pode ser aproveitada com a queima direta, para isso pode-se utilizar: Ciclo Rankine, ORC, motor Stirling, entre outros. Também pode ser feita a gaseificação dessa biomassa para ser utilizado em motores de combustão interna. Já o biogás, que também é uma espécie de gás de biomassa, pois provém da decomposição de matéria orgânica, pode ser obtido através da decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários ou mesmo em biodigestores.

Liu (2011) estudaram um modelo CHP (Central Heat and Power) de 2 kW a partir da queima de biomassa que utiliza o ORC. As simulações ocorreram para três fluidos de trabalho diferentes (HFE7000, HFE7100 e n-pentano). A maior eficiência obtida no ORC (16,6%) foi quando utilizado o n-pentano no sistema. Já a produção de eletricidade ficou entre 1,5 e 2,71

kW, o que indicou eficiências entre 7,5 e 13,5%, esses valores variam de acordo com a variação na temperatura dos gases que passam pelo evaporador. Também, a eficiência global da planta foi por volta de 80% para os três fluidos.

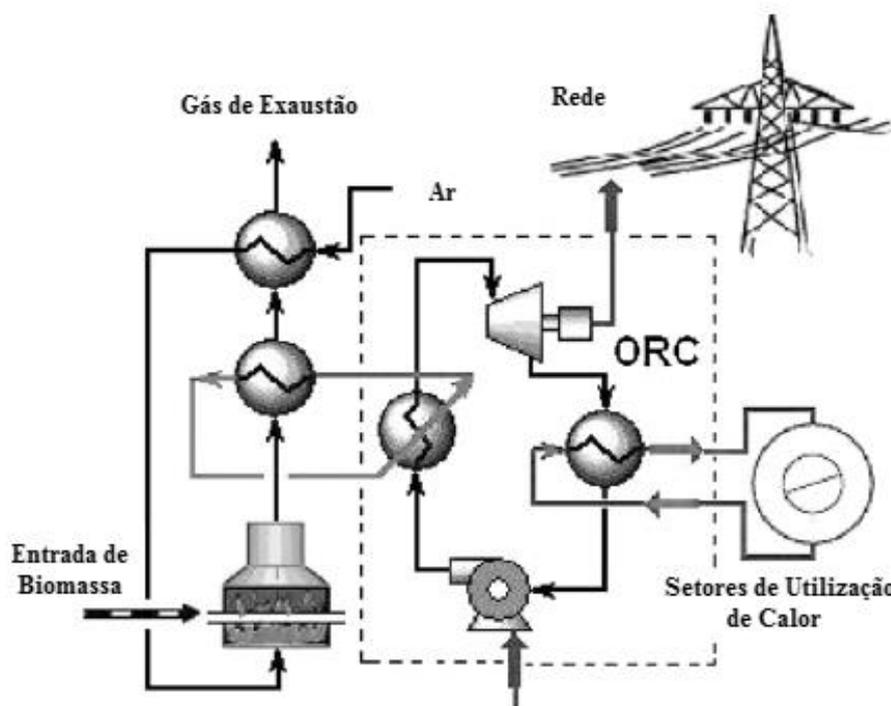


Figura 2.6 – Processo de utilização da biomassa como fonte de calor em ORC para produção de energias elétrica e térmica, por meio de queima direta (Veléz, 2012a).

Para o aproveitamento da energia proveniente da biomassa, duas tecnologias são consideradas, atualmente, as mais rentáveis, a gaseificação e a combustão. A primeira requer maiores investimentos, apesar de proporcionar mais eficiência ao processo, porém essa tecnologia ainda está em falta no mercado. Ao contrário, a combustão da biomassa pode ser facilmente utilizada no ORC, esta técnica está bastante difundida hoje em dia (Uris, 2014).

### 2.2.5 Recuperação de Calor Rejeitado

O calor rejeitado em plantas térmicas corresponde a mais da metade do poder calorífico fornecido a elas. Esse número corresponde a aproximadamente 55% do calor possível de ser retirado do combustível (Roy, 2010). Esta energia desperdiçada faz com que a eficiência dos equipamentos diminua. Junto com esse rejeito também são liberados poluentes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , etc) que contribuem com o aquecimento global e destruição da camada de ozônio. O calor liberado é classificado em três categorias de acordo com o nível da temperatura dos gases liberados, são elas: baixa (até 230 °C), média (de 230 °C a 650 °C) e alta (acima de 650 °C). Avanços têm sido feitos nas tecnologias para a recuperação desse

calor desperdiçado. Alguns métodos se baseiam em ciclos termodinâmicos como: Rankine, ORC e Kalina, por exemplo. O ORC pode ser considerado uma das melhores opções para o aproveitamento de rejeitos a baixas e médias temperaturas. Isso, porque tem pouca complexidade no sistema. A escolha dos componentes (incluindo o fluido de trabalho) do sistema baseia-se, na temperatura dos gases rejeitados e da potência desejada (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Alguns tipos de fontes de energia a ser recuperada com o uso do ORC (Tchanche, 2011).

<b>Categoria</b>	<b>Fontes de Calor</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Média Temperatura (230 °C - 650 °C)	Gases de Exaustão de Turbinas	370 – 540
	Vapor de Exaustão de Caldeiras	230 – 480
	<b>MCI (Gases de Exaustão)</b>	315 – 600
Baixa Temperatura (< 230 °C)	Processo de Condensação de Vapor	50 – 90
	<b>MCI (Exaustão e água e óleo de refrigeração)</b>	66 – 120
	Processo de Processamento a Quente de Líquidos e Sólidos	32 – 232

De acordo com Tchanche (2011) a transferência de calor entre o fluido de trabalho do ORC e os gases quentes pode ser feita diretamente no mesmo equipamento. Também pode ser realizada indiretamente com o uso de um óleo para evitar o contato entre o sistema e os gases liberados. O sistema ORC pode ser modulado para atender a diferentes demandas. Podem ser empregadas em diversas áreas para recuperação de calor, como: Centrais de geração elétrica, processos de manufatura, indústria automotiva, etc. As principais vantagens do ciclo são:

- Produzir eletricidade no local onde será utilizada. O que diminui gastos com redes de distribuição e perdas de carga nessas redes;
- Baixos custos de operação e manutenção;
- Maior segurança para os operadores do equipamento e para o meio ambiente.

Segundo Tchanche (2011) e Carcasci (2014) a demanda de energia necessária e o calor disponível na fonte não são parâmetros constantes. Isso faz com o sistema possa sair da faixa de operação estabelecida em projeto. Assim, sistemas de monitoramento e controle devem se instalados para não permitir que essas irregularidades ameacem a integridade do equipamento. Dentre as diferentes possibilidades de utilização do ORC, a de recuperar o calor dos processos industriais é a que cresce mais rapidamente. Mas ainda, assim como as outras, há a necessidade de ajudas dos governos (subsídios ou mesmo a diminuição ou abono de alguns impostos) para a difusão do seu uso no Brasil e no mundo.

Como representado pela Figura 2.7 o calor rejeitado nos processos em determinada indústria, por exemplo, uma termoeletrica a partir de motores a combustão interna, é utilizado para evaporar o fluido orgânico do ORC e esse vapor, ao passar pelo dispositivo de expansão, produz energia elétrica. Nota-se neste exemplo que, ainda, o calor rejeitado no condensador pode ser utilizado em processos onde há demanda por energia térmica.

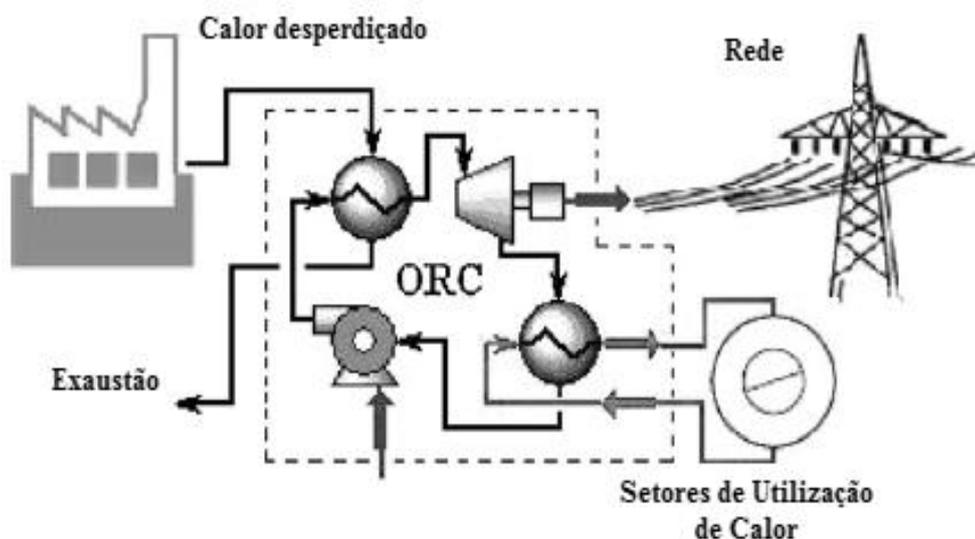


Figura 2.7 – Esquema de uma planta com ORC para recuperação do calor desperdiçado em processos industriais para produção de eletricidade e energia térmica (Veléz, 2012a).

## 2.3 Fluidos de Trabalho

Em Quoilin (2009) para aumentar a eficiência do sistema ORC instalado, são avaliadas algumas características do fluido de trabalho. Cada projeto de ORC tem suas peculiaridades, logo o fluido escolhido será definido de maneira onde o maior número de especificações, ou as mais importantes, sejam atendidas. Geralmente a análise é feita mantendo-se as temperaturas da fonte de calor e do reservatório constantes. Logo, ao simular o funcionamento do ciclo para diferentes fluidos é possível determinar aquele que melhor satisfaz as necessidades do projeto.

Quando se trata de ORC, o fluido de trabalho escolhido está diretamente relacionado à eficiência do ciclo, o que determina o desempenho e a viabilidade econômica da planta. Roy (2010) e Meinel (2014b) mostraram que para os fluidos úmidos, como são formadas gotículas ao final da passagem de vapor pela turbina, são superaquecidos antes de entrar no equipamento de expansão. Os fluidos isentrópicos e secos não formam partes líquidas durante a expansão, logo não é necessário superaquecê-los. Esses fluidos, com base no diagrama T-s, são classificados da seguinte maneira:

- Fluidos úmidos – Possuem a curva T-s com inclinação negativa (Figura 2.8(a));
- Fluidos isentrópicos – Possuem a inclinação da curva de vapor saturado quase vertical no diagrama T-s (Figura 2.8(b));
- Fluidos secos – Possuem a curva T-s com inclinação positiva (Figura 2.8(c)).

De acordo com o trabalho de Vélez (2012b) o fluido de trabalho utilizado no ORC, devido ao tipo de fonte de energia, nível de calor e finalidade, deve ter adequadas propriedades termodinâmicas às mais baixas pressões e temperaturas. Além de satisfazer vários requisitos, por exemplo: não ser prejudicial ao meio ambiente. Fluidos orgânicos que provocam danos à camada de ozônio (ODP) e/ou favorecem o aquecimento global (GWP) e precipitações de chuva ácida são descartados, às vezes até devido a leis ambientais, das análises e estudos de desempenho técnico-econômico no uso em sistemas ORC. Dentre esses fluidos estão: R11, R12, R113, R114, R123, R141b, entre outros. Além disso, os autores mostraram que a temperatura em que o fluido entra no dispositivo de expansão, bem como a razão de pressão dentro do equipamento, tem grande influencia na eficiência do sistema. Quanto maiores a temperatura e a razão de pressão, maior será o rendimento.

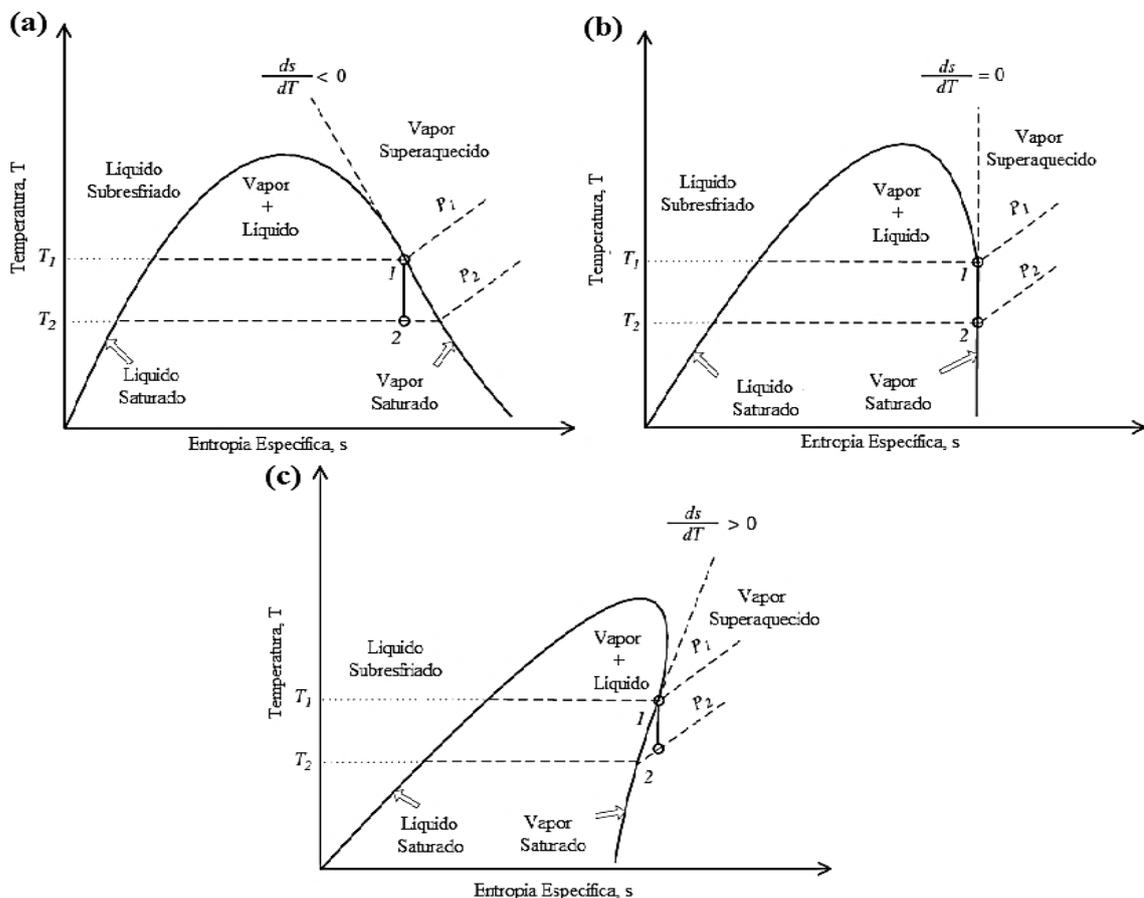


Figura 2.8 – Classificação dos fluidos de trabalho, úmidos (a), isentrópicos (b) e secos (c) (Bao, 2013).

Vários exemplos de fluidos orgânicos que podem ser utilizados no ORC são estudados em Bao (2013). Esses compostos foram classificados em: hidrocarbonetos, hidrocarbonetos aromáticos, éteres, perfluorcarbonetos, CFCs, álcoois e siloxanos. Os fluidos isentrópicos e secos são os mais adequados no uso em sistemas ORC (normalmente uma umidade igual ou inferior a 15%, ao final da expansão, é exigida), ainda mais os fluidos isentrópicos já que os ciclos com esses compostos não necessitam da instalação de um regenerador, equipamento de custo expressivo, depois do dispositivo de expansão. Esse regenerador faz com que o superaquecimento ocasionado pela expansão de um fluido seco não sobrecarregue o condensador. Sem o uso de tal equipamento, o ciclo que opera com um fluido seco necessita que a expansão ocorra seguindo a linha de vapor saturado (Figura 2.8(c)). Uma observação feita pelos autores é a que “quanto mais positiva é a inclinação da linha de vapor saturado, maior a complexidade da molécula do composto” (comparação válida para fluidos que estejam na mesma classificação).

Caso a fonte de calor seja o calor rejeitado em processos industriais, é necessário que o fluido possa evaporar a baixas temperaturas, por isso, o calor de vaporização deve ser baixo. Outra característica é a de que os sistemas necessitam de maiores trocadores de calor, que são mais caros, quando a densidade do fluido é baixa, ou seja, quando uma menor vazão mássica percorre o sistema. Vale lembrar que, obviamente, a temperatura de fusão do fluido de trabalho deve ser menor que a mais baixa temperatura que o sistema ORC atinge.

Para diminuir perdas de carga durante o escoamento do fluido pelo sistema e aumentar a eficiência dos trocadores de calor, fluidos com altos valores de viscosidade (tanto quando líquido como quando gasoso) e condutividade, respectivamente, são considerados. Em termos de recuperação de calor (baixa e média temperaturas), dos fluidos indicados pelos autores, àqueles que possuem melhor eficiência são: R-134a, R-245fa e tolueno (Bao, 2013). Também, o uso de misturas de dois ou mais desses fluidos faz-se interessante uma vez que a evaporação do composto pode ser garantida mesmo a temperaturas variáveis, como é a maioria dos casos em sistemas de geração de energia elétrica.

Algumas limitações quanto à escolha do melhor fluido de trabalho em determinado ocorrem, como é o caso da pressão dentro do sistema ORC ser maior que a pressão atmosférica, isso para que não haja entrada de ar frio no sistema, ou então quando o fluido opera perto de sua pressão crítica, onde pequenas mudanças de temperatura ocasionam grandes mudanças na pressão o que aumenta a instabilidade dos equipamentos.

No caso do ORC a determinação do composto orgânico. As características que fazem um fluido de trabalho ideal são:

- Fluidos isentrópicos ou secos (inclinação da curva de saturado no diagrama T-s nula ou positiva);
- Baixos calores específico e latente de vaporização;
- Alta densidade;
- Valores médios, no mínimo, de temperatura e pressão crítica;
- Pressão de condensação e evaporação entre 1 a 25 bar;
- Baixa viscosidade e alta condutividade térmica;
- Boa estabilidade térmica e química a altas temperaturas;
- Não corrosivo;
- Altas eficiências de primeira e segunda lei;
- Não inflamável e não tóxico;
- Baixo impacto ambiental e custos;
- Alta disponibilidade.

## 2.4 Cálculo de eficiência do ORC

Para o cálculo das eficiências de Primeira e Segunda Leis assumiu-se o Ciclo Rankine Ideal com superaquecimento.

### 2.4.1 Eficiência de Primeira Lei

A Primeira Lei da termodinâmica trata sobre a conservação da energia. Que a energia não pode ser destruída nem criada. Ela pode alterar a distribuição e/ou forma, mas nunca a quantidade. Logo, se em algum lugar a energia que se apresentava de uma forma tiver desaparecido, a mesma quantidade deverá aparecer em outro lugar. Segundo os trabalhos de Long (2014) e Song (2014), uma análise de eficiência de primeira lei significa o rendimento do fluido de trabalho escolhido para o sistema ORC.

A partir deste conceito os cálculos da eficiência de primeira lei e das potências em cada equipamento para um sistema ORC, utilizando o balanço de energia, de acordo com os trabalhos de Roy (2010) e Long (2014) e com os pontos de operação descritos na Figura 2.9, é:

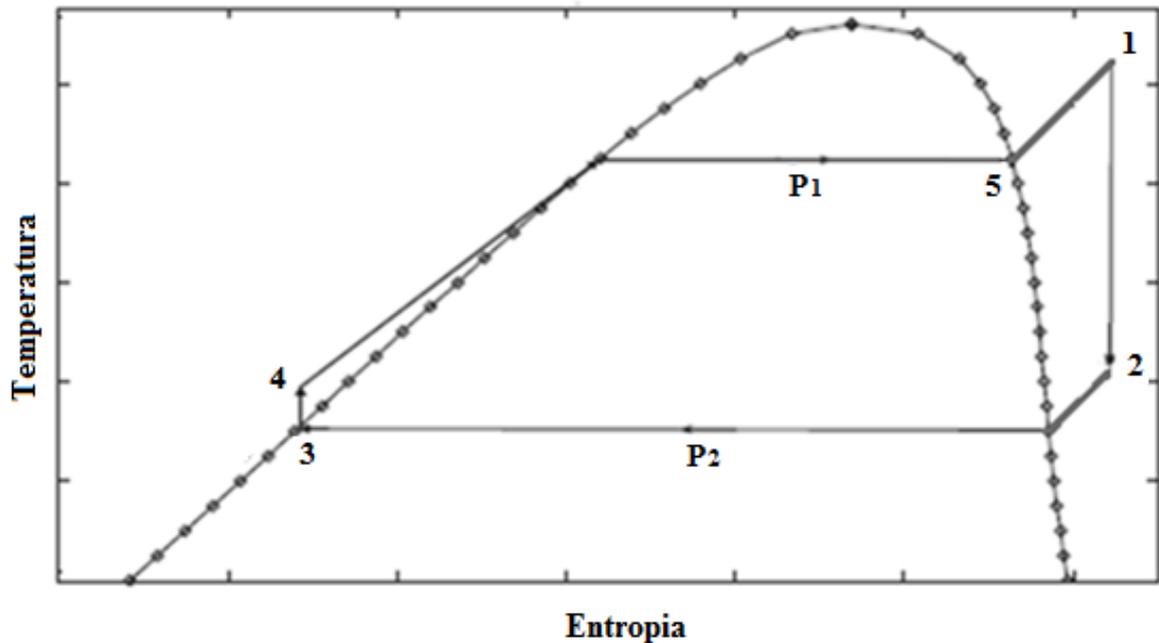


Figura 2.9 – Gráfico T-s do ORC em funcionamento (Roy, 2010 - modificada).

A expansão na turbina é feita no processo 1 – 2 e o trabalho produzido é dado pela Equação 2.1.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_f(h_1 - h_2) \quad (2.1)$$

No processo 2 – 3 acontece a condensação do fluido de trabalho, onde é descartada a energia calculada na Equação 2.2.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m}_f(h_2 - h_3) \quad (2.2)$$

Em 3 – 4 o fluido de trabalho é bombeado e a bomba utilizada nesse processo consome parte da energia produzida pela turbina (Equação 2.3).

$$\dot{W}_{b,f} = \dot{m}_f(h_4 - h_3) \quad (2.3)$$

E, para finalizar o ciclo ORC, o processo 4 – 5 é onde a energia residual dos gases de escape de um MCI é reaproveitada (Equação 2.4). Com isso o fluido de trabalho é evaporado.

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = - \dot{m}_f(h_4 - h_5) \quad (2.4)$$

Então, quando o fluido está no ponto de vapor saturado, ele entra no superaquecedor para ser levado até um estado de vapor superaquecido, processo que também aproveita a energia vinda dos gases de exaustão do motor (Equação 2.5). Vale ressaltar que é no superaquecedor que acontece o primeiro “contato” entre o fluido de trabalho e o calor rejeitado pelo MCI.

$$\dot{Q}_{\text{sup}} = -\dot{m}_f(h_5 - h_1) \quad (2.5)$$

Com isso a eficiência de primeira lei pode ser calculada pela Equação 2.6. Nota-se que o termo da bomba de água de condensação ( $\dot{W}_{b,a}$ ) pode ou não existir, depende da configuração do ORC.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{\text{líq}}}{\Delta\dot{E}_{\text{gás}}} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_{b,f} - \dot{W}_{b,a}}{\dot{E}_{\text{gás,e}} - \dot{E}_{\text{gás,s}}} \quad (2.6)$$

## 2.4.2 Eficiência de Segunda Lei

A quantidade de trabalho útil que pode ser obtida nos processos de transformação de energia é o que trata a Segunda Lei. É impossível converter, totalmente, energia térmica em trabalho útil, pois em qualquer conversão de energia uma parte dela é degradada (irreversibilidades). Logo, em todos os processos onde acontecem sucessivas mudanças de energia, a eficiência é, sempre, decrescente.

Nos ciclos ORC é comum fazer uma primeira análise considerando o ciclo ideal. Porém irreversibilidades acontecem durante os processos do sistema o que leva a um aumento de entropia. Tais irreversibilidades podem ser externas ou internas. Dentro dos componentes do ciclo ou na rede que os liga (Wei, 2007).

### I. Internas:

- Atrito nas tubulações, que ocasiona queda de pressão na rede (perda de carga);
- Expansões não controladas, principalmente nas turbinas;
- Perdas de calor internas devido às diferenças de temperatura do sistema com o meio.

### II. Externas:

- Perdas de calor externas devido às diferenças de temperatura do sistema com o meio;
- Perdas de potência mecânica por acoplamento e outras transferências de trabalho.

De acordo com Roy (2010) e Long (2014) o modo usado para calcular a eficiência de segunda lei é semelhante ao para a de primeira lei. Porém, agora é calculada a exergia destruída (entropia gerada) em cada processo e também a fornecida pelo combustível (Figura 2.10):

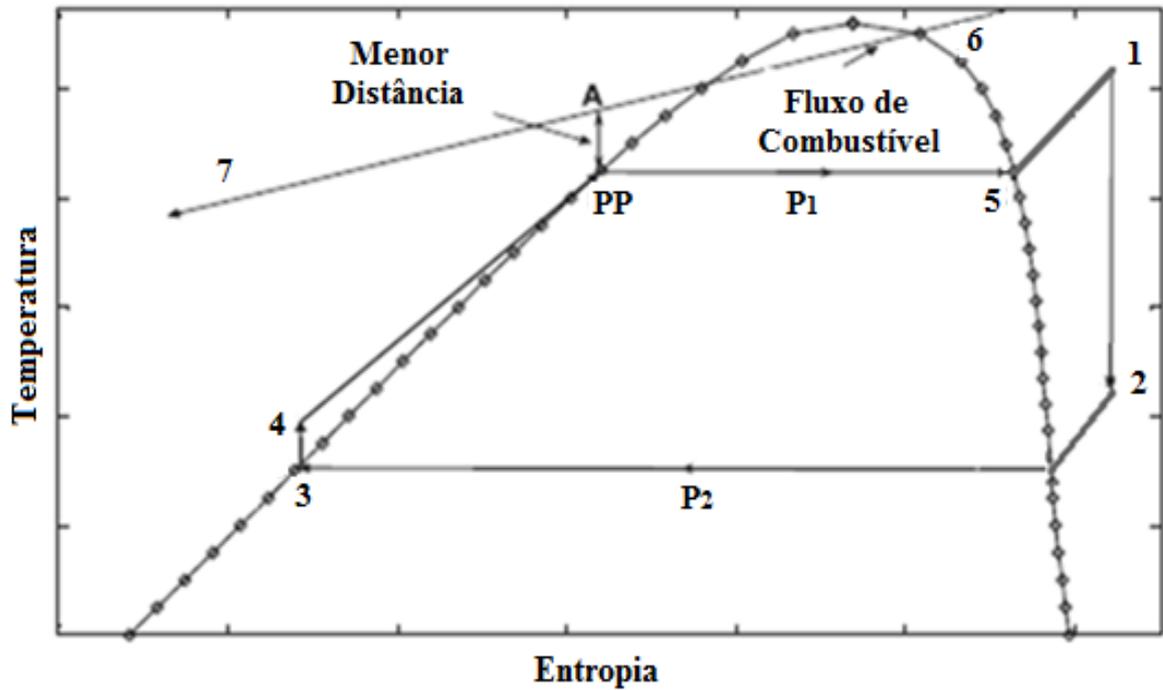


Figura 2.10 – Gráfico T-s do ORC em funcionamento com a reta T-s do fluxo de combustível (Roy, 2010 - modificada).

No processo de expansão (1 – 2) a exergia destruída é dada pela Equação 2.7.

$$\dot{I}_t = \dot{W}_{t,rev} - T_0 \cdot \dot{m}_f \cdot (s_2 - s_1) = \dot{W}_{t,rev} - \dot{m}_f \cdot |\Delta e_{F(1,2)}| \quad (2.7)$$

A Equação 2.8 mostra como é calculada a exergia destruída no condensador.

$$\dot{I}_{cond} = T_0 [\dot{m}_f (s_3 - s_2) - \dot{m}_a (s_e - s_s)] = \dot{m}_a \cdot \Delta e_{a(e,s)} - \dot{m}_f \cdot \Delta e_{F(2,3)} \quad (2.8)$$

Para o processo de compressão (3 – 4), a geração de entropia é calculada pela Equação 2.9.

$$\dot{I}_b = T_0 \cdot \dot{m}_f \cdot (s_4 - s_3) + \dot{W}_{b,f,rev} = \dot{m}_f \cdot |\Delta e_{F(3,4)}| + \dot{W}_{b,f,rev} \quad (2.9)$$

Para o evaporador (HRSG), têm-se a exergia destruída calculada pela Equação 2.10. Vale lembrar que este processo (4 – 5) faz contato com o gás de escape do motor após a passagem da fonte de calor pelo superaquecedor

$$\begin{aligned} \dot{I}_{evap} &= T_0 \{ \dot{m}_f (s_5 - s_4) + \dot{m}_{gás} (s_6 - s_7) \} \\ &= T_0 \left\{ \dot{m}_f (s_5 - s_4) + \dot{m}_{gás} \left[ C_{p,gás} \cdot \ln \left( \frac{T_7}{T_6} \right) - R \cdot \ln \left( \frac{P_7}{P_6} \right) \right] \right\} \\ &= \dot{m}_{gás} \cdot \Delta e_{F,gás} + \dot{m}_f \cdot \Delta e_{F(5,4)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

No superaquecedor, a exergia destruída é calculada como mostrado na Equação 2.11.

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{\text{sup}} &= T_0 \{ \dot{m}_f (s_1 - s_5) + \dot{m}_{\text{gás}} (s_6 - s_{\text{gás},e}) \} \\
&= T_0 \left\{ \dot{m}_f (s_1 - s_4) + \dot{m}_{\text{gás}} \left[ C_{p_{\text{gás}}} \cdot \ln \left( \frac{T_{\text{gás},e}}{T_6} \right) - R \cdot \ln \left( \frac{P_{\text{gás},e}}{P_6} \right) \right] \right\} \quad (2.11) \\
&= \dot{m}_{\text{gás}} \cdot \Delta e_{F,\text{gás}} + \dot{m}_f \cdot \Delta e_{F(1,5)}
\end{aligned}$$

Assim, a eficiência de Segunda Lei é calculada pel Equação 2.12. Também, bem como na Equação 2.6), o termo da bomba de água de condensação ( $\dot{W}_{b,a}$ ) pode ou não existir, depende da configuração do ORC.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{\text{líq}}}{\dot{m}_{\text{gás}} \cdot \Delta e_{F,\text{gás}}} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_{b,f} - \dot{W}_{b,a}}{\dot{m}_{\text{gás}} (e_{F,\text{gás},i} - e_{F,\text{gás},o})} \quad (2.12)$$

### **3 ESTADO DE PESQUISAS DO ORC NO BRASIL E POTENCIAL ENERGÉTICO DA RECUPERAÇÃO DE CALOR EM MCI**

Neste capítulo é apresentado o nível que se encontram as pesquisas sobre o ORC no Brasil. Além da performance do ORC para produção de potência a partir da recuperação de calor de motores a combustão interna que, vale lembrar, é o alvo da presente dissertação.

#### **3.1 ORC no Brasil**

Muitos trabalhos sobre a tecnologia ORC apresentados em congressos e teses de mestradados e doutorados estão sendo realizados no Brasil desde o ano 2000. Porém, a implantação de uma planta com esse sistema, para fins comerciais, ainda não aconteceu. No trabalho de Rodríguez (2013) os autores analisaram as performances dos ciclos Kalina e ORC na produção de eletricidade, isso, a partir da energia geotérmica. Diferentes composições da mistura amônia/água foram avaliadas para o ciclo Kalina, bem como diferentes fluidos de trabalho para o ORC. Para uma fonte que esteja a 100 °C, no caso estudado, o R-290 é o fluido que proporciona maior produção de potência para o ORC (1.800 kW), já para o ciclo Kalina é a concentração de 84% de amônia (1.848 kW). Além das eficiências de Primeira e Segunda Leis de, respectivamente, 8,47% e 47,6% para o ORC e 6% e 36,5% para o ciclo Kalina. Porém, para o ciclo Kalina foi observado um custo específico de produção elétrica de 0,178 €/kWh, que é 17,8% menos que para o ORC (0,217 €/kWh). Logo, para optar pela implantação de um ciclo ou outro, deve-se levar em conta que para o ciclo Kalina a produção será maior e com menor custo específico, porém a complexidade do sistema é maior que a do ORC e com isso a chance de problemas no funcionamento aumentam.

No Brasil 44% da matriz energética é referente a recursos renováveis, distribuídos por: madeira e carvão vegetal (10%), fontes hídricas (15%), cana-de-açúcar (16%) e solar / eólica (3%) (Vilela, 2014). Das instalações para produção de energia elétrica, apenas 4% são a partir de termoelétricas. Porém nenhuma delas utiliza o carvão vegetal como combustível. Esses autores analisaram o desempenho de uma planta para produção de carvão vegetal, integrada com um sistema ORC para geração de energia elétrica (Figura 3.1), onde 60% da madeira utilizada no processo deu origem ao carvão vegetal, 4,6% foram às perdas térmicas, 1,5% ao alcatrão e 10,8% à energia utilizada no processo em si. Também foi produzido o gás

combustível ou “gás pirolizado” que correspondia a 23,1% daquela madeira utilizada como combustível no processo.

Esse gás foi queimado e a energia da queima foi utilizada para aquecer um óleo térmico e, posteriormente, o fluido orgânico do ORC no evaporador. As análises foram feitas experimentalmente na cidade de Buritizeiro – MG numa planta que opera dentro da *Rima Group Forest Unit* pertencente à Rima Industrial S/A sediada em Belo Horizonte – MG, e para os cálculos físicos e químicos foi desenvolvido um programa no MS Excel Solver com essa finalidade. Das quatro configurações de ORC estudadas, duas se destacaram por ter: em uma delas, que queimava gás combustível e resíduos vegetais, a maior produção de eletricidade e eficiência e na outra, que fazia uso apenas do gás combustível, pelo baixo custo específico de produção. No ORC simulado onde foi queimado apenas o gás pirolizado obteve-se um custo específico de 29,50 USD\$/MWe contra 29,71 USD\$/MWe do sistema onde eram queimados além do gás combustível, alguns resíduos vegetais. Porém, para este segundo, 4,1 MWe foram produzidos com uma eficiência de 18,2%, já para o sistema onde apenas a queima do gás era a fonte térmica foram gerados 3,04 MWe com 13,37% de eficiência.

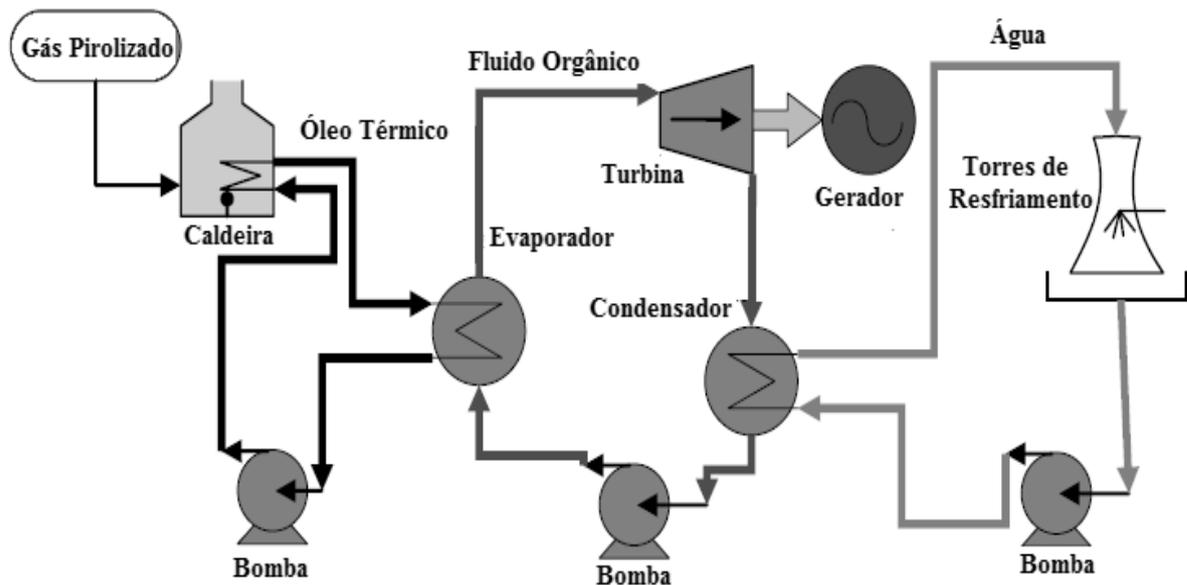


Figura 3.1 – Esquema do sistema ORC que utiliza a queima de gás pirolizado como fonte de calor (Vilela, 2014).

### **3.2 Avaliação do desempenho do ORC que utiliza a recuperação de calor residual de um MCI como fonte de calor**

Com base nas condições atuais de conservação do meio ambiente e políticas para redução do consumo dos combustíveis fósseis, a crescente busca por tecnologias que propiciem o aumento da eficiência energética dos motores de combustão interna MCI, que é de 20 a 40% dependendo do equipamento, é evidente. Vários trabalhos são realizados para determinação dos melhores parâmetros para alcançar este objetivo. As leis ambientais focam, principalmente no nível de emissões, proveniente desses motores, de: monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e particulados. Para tal caso, catalisadores que convertem essa matéria prejudicial emitida em nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos menos prejudiciais ao meio ambiente estão em constante desenvolvimento já são realidade. Logo, o foco será voltado para as emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). Ganham espaço, então, os sistemas de recuperação de calor, que diminuem o consumo de combustível e aumentam os ganhos na produção de potência mecânica ou elétrica sem o aumento dos níveis de emissão desse gás. O calor rejeitado pelos MCI de média e baixa temperatura provém de duas fontes principais: os gases de exaustão e o sistema de arrefecimento do equipamento (Wang, 2011).

Segundo Sprouse III (2013) o sistema de recuperação de calor de um MCI é o alvo do maior número de trabalhos de pesquisa, no que tange ao sistema ORC. Este ciclo orgânico apresenta entre 7 a 10% de eficiência, o que leva a cerca de 10% de economia de combustível com o uso dessa tecnologia. Essa diminuição nos custos com o combustível faz com que o sistema atinja *payback* em um período de 2 a 5 anos, dependendo do tamanho da planta.

Um tipo de irreversibilidade do MCI acontece dentro da câmara de combustão. A expansão acontece de maneira que altas temperaturas são atingidas, o fluido alcança o estado de turbulência e são geradas grandes transferências de calor tanto pelas paredes do cilindro quanto pela cabeça do pistão. Tais fatores limitam a eficiência do motor ao fazer com que os gases de exaustão cheguem a pressões maiores que a da atmosfera e sejam expelidos antes que completa expansão aconteça (Saidur, 2012).

Nos trabalhos de Zhang (2013), Wang (2012) e Yang (2014) foram realizadas pesquisas para determinar a performance dos sistemas de recuperação de calor em MCI. Respectivamente, os trabalhos realizaram simulações do funcionamento, sob várias condições de operação, destes sistemas integrados (MCI – ORC duplo) para: um motor diesel de pequeno porte, um motor a gasolina e outro motor diesel. Para os três sistemas o esquema de

funcionamento é, praticamente, o mesmo (Figura 3.2). A principal diferença está no fato do motor a gasolina dispensar o uso do *intercooler*. O ORC 1 recupera o calor proveniente dos gases de exaustão do MCI, esta representado na Figura 3.2 por PE. Neste estágio há, também, um recuperador de calor dos gases de exaustão da Turbina 1 que aumenta a temperatura ao Evaporador 1. Já o ORC 2 (SE) recebe o calor do sistema de refrigeração do motor e do ar que entra para as câmaras de combustão (esta última fonte não existe no motor a gasolina). Um pré-aquecedor (que é também o condensador do primeiro estágio) foi instalado neste estágio para aumentar a temperatura ao final do Evaporador 2.

A seguir se apresenta um resumo destas 03 pesquisas no que concerne às eficiências e parâmetros termodinâmicos dependendo do tipo de combustível e faixa de operação do MCI.

- I. Zhang (2013) usou o R245fa como fluido refrigerante para o PE (ORC principal) e o R123 para o SE (ORC secundário). Considerações de temperatura e pressão de condensação e evaporação, bem como de eficiência dos componentes do sistema foram adotadas. As simulações ocorreram segundo velocidades de rotação entre 1.000 e 4.000 rpm (cargas do mínimo indicado para estabilidade do sistema até 100%). Com isso obteve-se rendimentos de 7,8% para o PE e 8,89% para o SE. No ponto de operação ideal, o consumo específico de combustível foi reduzido de 212 g/kWh para 185 g/kWh. Por fim, o aumento na produção de energia do sistema integrado ficou entre 14 e 16% no ponto de operação ideal, mas pode chegar até 43% para baixas cargas no motor e altas velocidades de rotação. Logo, o sistema MCI – ORC duplo provou ser uma ótima forma de economia.
- II. Wang (2012) também usaram o R245fa para o ORC 1, mas, para o SE optaram pelo R134a. Considerações análogas às de Zhang et al. (2013) foram adotadas. O motor foi simulado dentro de uma faixa de velocidade de operação que vai de 1000 a 5900 rpm e, assim como no trabalho anterior, as cargas variam do mínimo indicado para estabilidade do sistema até 100%. O rendimento e a energia produzida nos ciclos orgânicos PE e SE e o ponto de operação ideal foram, respectivamente, 7,16% - 9,57 kW para o PE e 7,72% - 26,39 kW para o SE. Isso implica no aumento, de 14 a 16% na produção de energia do sistema integrado, com máxima de 50% quando opera com alta velocidade e baixo carregamento. Ainda, a eficiência térmica do sistema pode aumentar entre 3 a 6% com o uso dos sistemas integrados, o que, também nesse estudo, prova sua economia.
- III. Yang (2014) fizeram a simulação com um outro motor diesel de combustão interna com metodologia considerações análogas às de Zhang (2013) e Wang (2012), porém,

usaram apenas o R245fa como fluido de trabalho, ou seja, tanto para o PE quanto para o SE. A faixa de operação do motor é de 900 a 1.900 rpm e o carregamento pode chegar a 247 kW. Os sistemas ORC: PE e SE, produziram, respectivamente, 10,0 kW e 17,85 kW no ponto de operação ideal para o sistema integrado com eficiência do sistema de recuperação de calor de 5,4%. Uma economia de 13% no combustível também foi mostrada, e pode aumentar ainda mais quando o motor opera sob médias e altas condições de carregamento. Mais uma vez o MCI – ORC duplo mostra que pode obter maiores eficiências energéticas e economia.

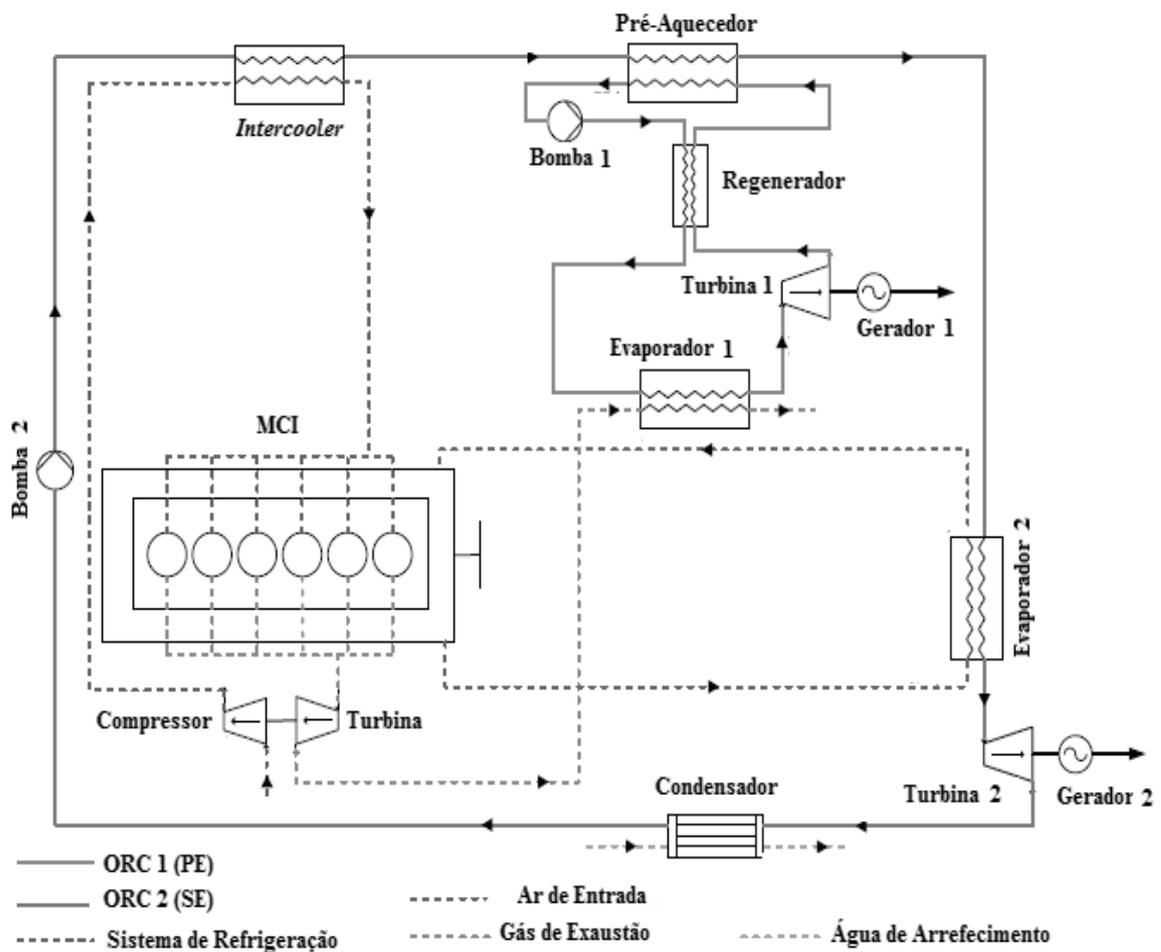


Figura 3.2 – Esquema de funcionamento do sistema integrado MCI a diesel – ORC duplo. Lembra-se que o motor a gasolina segue o mesmo esquema, porém, sem o equipamento de intercooler (Yang, 2014).

Outro modelo de recuperação de calor com base na tecnologia ORC foi analisado no trabalho de Tian (2012) (Figura 3.3), onde cerca de um terço da energia total do combustível era liberada pelo sistema de exaustão em forma de gás a 590 °C. O MCI produzia, por si só, 235,8 kW de potência elétrica e tinha um consumo de 943 kg/h de combustível. Os autores analisaram para 20 diferentes tipos de fluidos de trabalho (dos tipos úmidos e isentrópicos), dentre outros parâmetros, a eficiência térmica do sistema, a energia elétrica produzida e o

custo de produção desta eletricidade. O sistema era composto por um ciclo combinado diesel – ORC, deles, o ciclo diesel era o principal e o ORC o de recuperação de energia. O gás de exaustão composto de: 15,10% de CO<sub>2</sub>, 5,37% de água, 73,03% de N<sub>2</sub> e 6,49% de O<sub>2</sub>, passava por três trocadores de calor, respectivamente, um superaquecedor, um evaporador e um pré-aquecedor que, na sequência contrária, forneciam energia ao fluido orgânico para que este, por sua vez, gera-se a energia elétrica desejada. Os fluidos que melhor satisfizeram os requisitos dos autores foram: o R141b, R123 e o R245fa, nesta ordem, que apresentaram os maiores valor de eficiência térmica e potência produzida e os menores preços para a eletricidade produzida, respectivamente, 16,6 a 13,3% para o R141b, 60 a 49 kJ/kg para o R123 e 0,3 a 0,35 \$/kWh para o R245f.

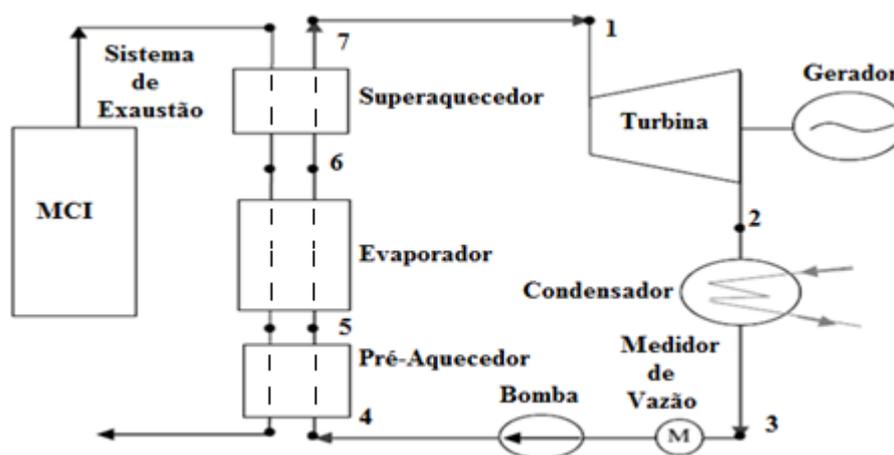


Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do ciclo combinado diesel – MCI simulado por Tian (2012) (Tian, 2012).

Várias configurações do sistema ORC podem ser utilizadas para recuperação de calor da água de refrigeração das jaquetas de um MCI. Peris (2013) realizaram um estudo sobre qual conformação seria a mais adequada em tal aplicação do ciclo combinado (diesel – ORC) para produção de energia elétrica (Figura 3.4). Os arranjos de ORC analisados pelos autores foram: básico (i), regenerativo (ii), regenerativo duplo (iii), regenerativo com reaquecimento (iv), ejetor (v) e regenerativo transcrito (vi). Para diferentes fluidos de trabalho, a eficiência na produção elétrica desses arranjos é descrita na Figura 3.5. Logo, o modelo mais eficiente foi o regenerativo duplo, com 7,15%, o que proporcionou ao sistema um ganho de eficiência de produção de energia elétrica de 5,3%. Outras duas configurações que tiveram bons resultados foram a regenerativa e a regenerativa com reaquecimento, que tiveram uma eficiência de 6,55% e aumentaram a eficiência da produção elétrica do sistema em 4,9%.

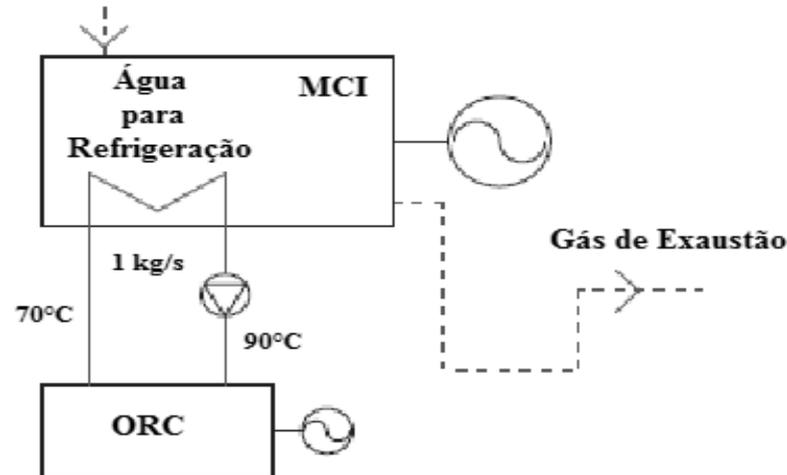


Figura 3.4 – Esquema de funcionamento do ciclo combinado diesel – ORC para recuperação do calor da água de refrigeração das jaquetas do MCI (Peris, 2013).

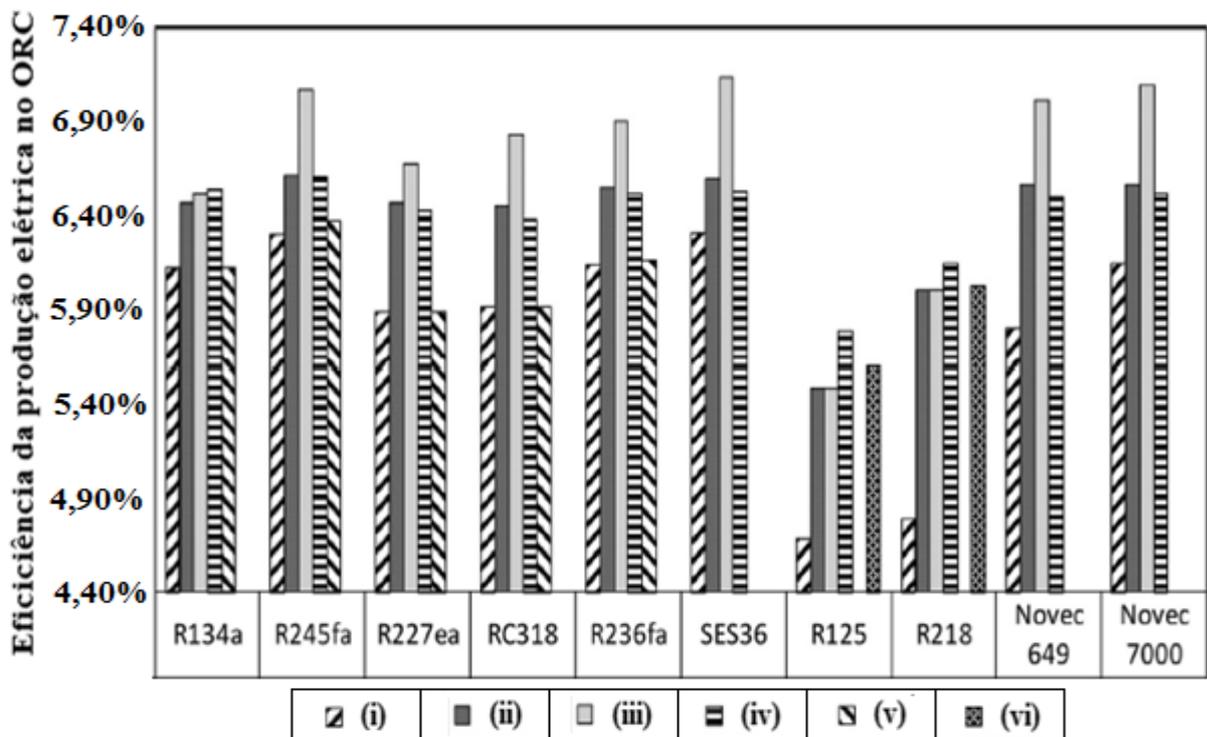


Figura 3.5 – Resultados das simulações para as diferentes configurações de ORC e diferentes fluidos de trabalho, no que se diz respeito à produção de eletricidade (Peris, 2013).

Para os MCI's a diesel (ciclo diesel) a eficiência está entre 30 e 40% já para os motores a gasolina (ciclo otto) ela se encontra entre 20 e 30% . O resto da energia, como dito anteriormente, é descartada para o meio de várias formas: nos gases de exaustão, no sistema de refrigeração, no sistema de lubrificação e por radiação. Apenas dos três primeiro é viável a recuperação dessa energia. Para recuperá-la uma forma é a tecnologia ORC (Zhu, 2013), porém, esse método remete a algumas restrições, são elas, principalmente:

- As temperaturas máxima e mínima que o fluido de trabalho pode atingir, sem que haja queima extra de combustível, é, respectivamente, a da fonte de calor e a do fluido de condensação;
- A mínima diferença de temperatura, dentro do evaporador, entre o fluido orgânico e a fonte de calor deve ser maior que 10K. Isso para assegurar a transferência de calor entre eles;
- Se existe um superaquecedor no sistema, a máxima temperatura que o fluido orgânico pode atingir é aquela que não promove sua decomposição;
- Para evitar incrustações no evaporador pelos compostos do gás de exaustão, quando o calor deste for recuperado, ele deve estar com temperatura acima de 90°C;
- A fim de evitar vazamentos no condensador e diminuir os gastos com sistemas de vedação, a pressão máxima na entrada do equipamento deve ser de 1 bar. Já no evaporador ela deve ser no máximo de 35 bar, caso contrário, os custos dos equipamentos do sistema aumentariam além do limite assim como aconteceria se a temperatura de evaporação for maior que 85% da temperatura crítica do fluido;
- O título do fluido ao final da expansão deve ser maior ou igual a 0,9. Também para o dispositivo de expansão, a razão de pressão dentro do equipamento não deve exceder o valor de 10;

De acordo com Shu (2014a) em alguns casos é interessante não o uso de um fluido orgânico puro, mas sim uma mistura zeotrópica (temperaturas de condensação e ebulição são alteradas durante os respectivos processos) como fluido de trabalho no ORC. A principal vantagem disso é que durante o processo de evaporação (2 – 4), o perfil da mistura acompanha melhor o da fonte que o perfil do fluido puro. O que promove uma transferência de calor mais eficiente e, com isso, uma temperatura de saída do evaporador mais elevada bem com a temperatura de evaporação média. De maneira semelhante o processo no condensador (5 – 1) acontece com maior eficiência quando o fluido é uma mistura zeotrópica. Isso, pois a temperatura média de evaporação e de saída do condensador é menor que a do fluido único. Também, após estudar um caso onde o emprego de uma mistura zeotrópica como fluido de trabalho para um sistema de recuperação de calor de um MCI a partir do ORC, onde os fluidos eram as misturas: ciclohexano/R123, benzeno/R123, ciclohexano/R11 e benzeno/R11, em diferentes proporções de mistura. O resultado foi que a mistura benzeno(0,7)/R123(0,3) teve o melhor desempenho com a eficiência do ciclo de 15,03%, e pode chegar à 16,58% caso seja feito uso de um recuperador de calor.

## 4 ANÁLISE TÉCNICA

A seguir é apresentada uma análise técnica sobre um ciclo ORC que utiliza o calor do gás de exaustão de um motor de combustão interna a diesel. Este estudo avalia os fluidos orgânicos que geram mais potência no ORC, necessitam de menor vazão de água no condensador e promovem menores perdas por irreversibilidades ao longo do ciclo. Ao final, os fluidos melhor avaliados nestes quesitos, passaram por uma análise econômica, que é o foco do próximo capítulo.

### 4.1 Motor e sistema ORC analisado

#### 4.1.1 Motor

Para exemplificar a metodologia abordada neste trabalho, foi escolhido um motor de combustão interna a diesel estacionário de médio porte (Figura 4.1). Este motor foi escolhido, pois é um dos equipamentos utilizados por uma termelétrica situada na região Nordeste do Brasil, apesar da proposta de projeto de um ciclo termodinâmico que captaria a energia rejeitada por esses motores na termelétrica usando ciclos ORC não ter avançado, a pesquisa foi realizada com sucesso e o resultado está sendo apresentado neste trabalho de dissertação. O grupo gerador é fabricado pela CATERPILLAR® (Tabela 4.1).



Figura 4.1 – Motor CATERPILLAR C32 ATAAC (Manual CATERPILLAR®, 2008).

Tabela 4.1 – Características do MCI utilizados como referência para o presente trabalho.

<b>Modelo</b>	<b>Motor Diesel CATERPILLAR C32 ATAAC</b>
<b>Potência</b>	830 kW
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Rotação</b>	1800 rpm
<b>Tensão</b>	480 V
<b>Combustível</b>	Diesel S-500

O motor, como mostrado na Tabela 4.1 produz 830 kW e o gás que sai pelo sistema de exaustão é direcionado para o sistema ORC que servirá de fonte de calor para o ciclo. Esse gás de exaustão sai do motor com as características apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características do gás de exaustão do MCI utilizado como referência para o presente trabalho (operação a 100% da carga).

<b>Temperatura do gás do coletor de escape</b>	473,2 °C
<b>Vazão do gás de escape</b>	5,172 kg/h
<b>Emissão do NO<sub>x</sub></b>	7,9357 x 10 <sup>-6</sup> g/(kWh)
<b>Emissão de SO<sub>2</sub></b>	500 ppm
<b>Material particulado presente</b>	2,8150 x 10 <sup>-8</sup> g/(kWh)

O combustível utilizado no motor (Diesel B S-500 PETROBRÁS) é um hidrocarboneto de fórmula química resumida C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> (dodecano) com aproximadamente 0,15 mol de nitrogênio e 0,0027 mol de enxofre por mol do composto e API 35°. Em um processo de combustão o diesel é queimado com 20% de excesso de ar (foi adotado ar ideal). Logo, o gás eliminado pelo sistema de exaustão do motor tem a porcentagem em massa como a descrita na Tabela 4.3. Observa-se que como o material particulado liberado não tem potencial para gerar energia ele não entra na distribuição das porcentagens de massa do gás. Como característica adicional, a 100% da carga, o consumo é de 223,7 litros de combustível por hora de operação.

Tabela 4.3 – Características do gás de exaustão do MCI utilizado como referência para o presente trabalho (operação a 100% da carga).

<b>Componente</b>	<b>[%]</b>
O <sub>2</sub>	3,54
N <sub>2</sub>	72,75
CO <sub>2</sub>	16,43
H <sub>2</sub> O	7,28

#### **4.1.2 ORC (*Organic Rankine Cycle*)**

Os sistemas ORC escolhidos para aumentar a eficiência da planta de geração de energia elétrica inclui um trocador de calor do tipo superaquecedor, além, é claro, dos componentes básicos (evaporador, dispositivo de expansão, condensador e bomba). Segundo Cayer (2010), a implementação de outros equipamentos ao ciclo, como um regenerador, aumentaria a eficiência do ORC em tão baixa escala que não compensaria o investimento nesse dispositivo. Dois modelos de sistemas de condensação foram simulados no software

ASPENtech® HYSYS instalado nos computadores do laboratório de simulação do IEM-UNIFEI. Um deles funciona a partir da alimentação do condensador com água fornecida na rede de água da cidade (Figura 4.2(a)), o outro modelo funciona com um sistema de resfriamento da água que contém uma bomba e uma torre de resfriamento que visa à implantação em locais onde o acesso à água da rede não é simples (Figura 4.2(b)).

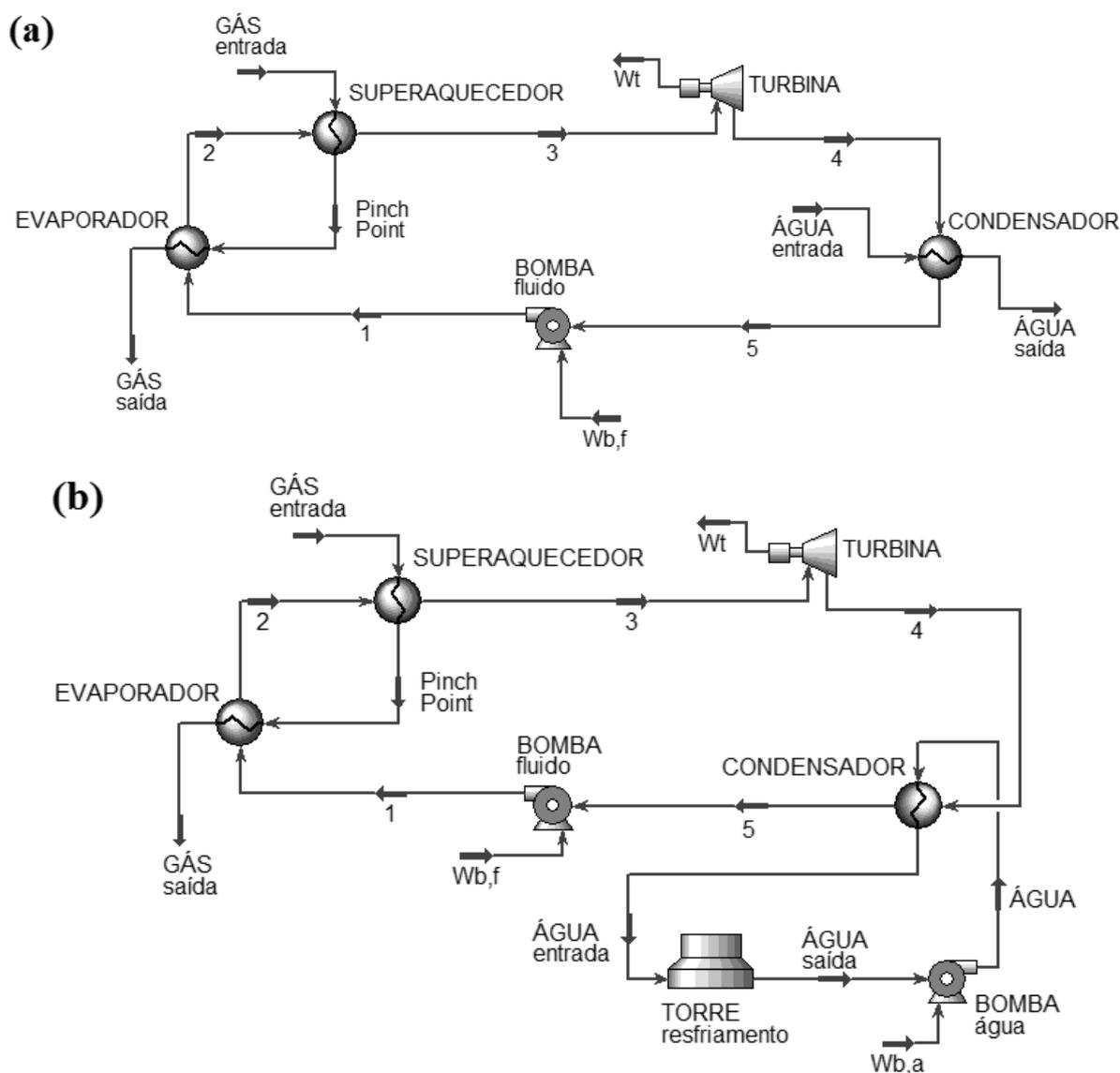


Figura 4.2 – Esboço do sistema ORC analisado, (a) com alimentação do condensador pela água da rede e (b) com sistema de resfriamento da água de condensação.

Vale ressaltar que os pontos 2, mostrados na Figura 4.2, representam a temperatura de evaporação do fluido de trabalho. Também indicam onde acontece o chamado “*Pinch Point*”, que é a menor diferença de temperatura entre as correntes do gás de escape do MCI e o ciclo orgânico. Também é a temperatura de evaporação do fluido de trabalho.

Tomou-se como base para a escolha do modelo de cada equipamento utilizado, tanto no sistema ORC quanto no de resfriamento da água de condensação, os seguintes parâmetros

descritos na Tabela 4.4, obtidos no livro “*Synthesis and Design of Chemical Processes – 3ª edição*” de Turton (2008).

Tabela 4.4 – Parâmetros e modelos de cada equipamento dos sistemas simulados.

Equipamento	Parâmetro	Modelo
Turbina	Potência produzida (kW)	Radial
Condensador	Área (m <sup>2</sup> )	Casco e tubo de múltiplos tubos
Bomba de fluido	Potência consumida (kW)	Alternativa
Evaporador	Área (m <sup>2</sup> )	Casco e tubo de tubo curto
Superaquecedor	Área (m <sup>2</sup> )	Casco e tubo de múltiplos tubos
Bomba de água	Potência consumida (kW)	Alternativa
Torre de resfriamento	Volume (m <sup>3</sup> )	<i>Tray and packed</i>

## 4.2 Fluidos orgânicos utilizados

Os fluidos orgânicos selecionados para as análises da presente dissertação foram determinados por base de três princípios, além daqueles mencionados na secção 2.3 do Capítulo 2 deste trabalho. São eles:

- I. Valores razoáveis para máxima pressão e temperatura de evaporação. Uma vez que perto do ponto crítico pequenas variações na temperatura implicam em grandes mudanças na pressão, o que deixa o sistema instável. Também, como mostrado na Figura 4.3 pela expansão A–B em  $T_{s,1}$ , se esses valores não estiverem a uma distância considerável do ponto crítico, pode haver mistura de fase dentro do dispositivo de expansão, o que não é desejado (Bao, 2013);

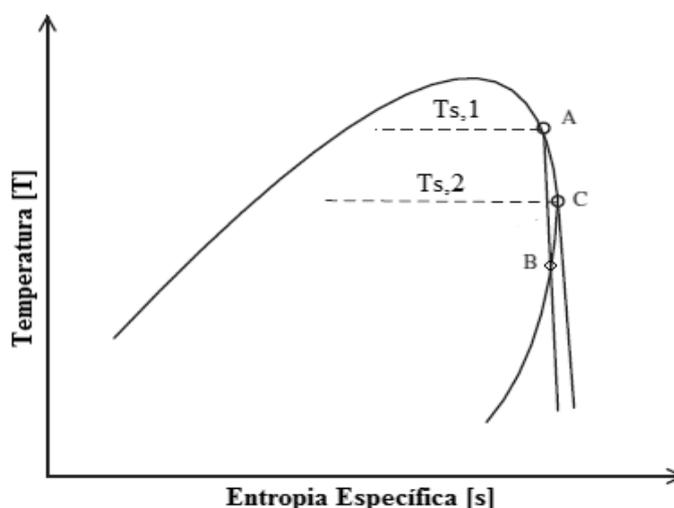


Figura 4.3 – Expansão A-B onde há mistura de fases no dispositivo de expansão e expansão C, desejada para o sistema ORC em análise (Bao, 2013 - modificado).

- II. Valores razoáveis para mínima pressão e temperatura de condensação. O ponto de condensação do sistema deve ser escolhido de maneira que a pressão seja maior que a atmosférica, isso para que não haja qualquer entrada de ar frio (Bao, 2013);
- III. Disponibilidade dos fluidos no ASPENtech® HYSYS versão 8.6, software utilizado para auxiliar na realização da análise técnica do sistema proposto.

Assim, foi apresentado na Tabela 4.5 os fluidos orgânicos selecionados com seus respectivos limites de pressão e temperatura de acordo com (Bao, 2013).

Tabela 4.5 – Fluidos de trabalho para o sistema ORC analisado no presente trabalho, com seus respectivos limites de temperatura e pressão (Bao, 2013).

<b>Fluido orgânico</b>	<b>Máxima pressão de evaporação [kPa]</b>	<b>Máxima temperatura de evaporação [°C]</b>	<b>Mínima pressão de condensação [kPa]</b>	<b>Mínima temperatura de condensação [°C]</b>
Acetona	3.379	213	30,7	25
Benzeno	4.067	274	12,7	25
Butano	3.073	138	234,7	25
Buteno	2.808	125	297,2	25
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	2.057	107	268,2	25
C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	1.803	141	84,7	25
Ciclohexano	3.665	272	13	25
Decano	1.896	337	5,1	85
Dodecano	1.723	381	5,1	121
Heptano	2.410	258	6,1	25
Hexano	2.680	226	20,2	25
Isobutano	2.890	121	350,5	25
Isobuteno	2.877	125	305	25
Isopentano	2.887	177	91,8	25
Neopentano	2.788	152	171,4	25
Nonano	2.059	314	5,0	65
Octano	2.200	287	5,0	44
Pentano	2.865	186	68,3	25
Tolueno	3.576	307	5,1	31
Transbuteno	2.906	136	234,1	25

### 4.3 ASPEN<sup>®</sup>tech HYSYS

O ASPEN<sup>®</sup>tech HYSYS é o software líder no quesito de modelagem e simulação na indústria de petróleo e gás, refino e processos de engenharia. Tem em seu pacote uma grande quantidade de unidades de operação, equipamentos e ambientes de trabalho que permite ao usuário:

- I. Melhorar o projeto de equipamentos, quanto à concepção e desempenho;
- II. Monitorar aspectos de segurança e operacionais de uma planta;
- III. Otimizar a capacidade e as condições de operação de projetos;
- IV. Identificar possibilidades em economizar energia nas instalações e diminuir a emissão de gases do efeito estufa (GEE);
- V. Além de avaliar opções econômicas durante os processos.

Na versão 8.6 do software foram mantidas as características principais de modelagem e simulação que são a marca do programa, com pacotes integrados e com base na experiência dos usuários. Assim, novos recursos foram adicionados ao software, que não teve sua flexibilidade nos modelos de cálculos alterada. Cabe ressaltar que o grupo de pesquisa da GETEC (Grupo de Estudos em Tecnologias de Conversão Energética) da UNIFEI, do qual, o autor da presente dissertação faz parte, adquiriu recentemente a licença comercial deste software o que garantiu a culminação das simulações.

### 4.4 Características da simulação

Algumas considerações e parâmetros foram admitidos para realizar as simulações computacionais, a fim de manter o padrão de avaliação dentre os diversos fluidos de trabalho envolvidos. Essas considerações são basicamente sobre as temperaturas e pressões em alguns pontos do ciclo orgânico. Também dizem respeito aos equipamentos utilizados bem como o escoamento por eles e pelos tubos conectores. Tais características são apresentadas na Tabela 4.6.

Essa análise ocorreu com auxílio do software da ASPEN<sup>®</sup>tech HYSYS versão 8.6. Onde parte dos cálculos termodinâmicos que envolvem aspectos da Primeira e Segunda Leis da termodinâmica foram resolvidos segundo as formulações apresentadas na seção 2.4 do Capítulo 2 do presente trabalho. O *pinch point* escolhido é que, segundo a literatura (Bao, 2013, Zhu, 2013, Shu, 2014, etc), o valor máximo aceitável para aproveitar o calor com o sistema ORC sem que haja grandes perdas de eficiência. Por fim, as propriedades termodinâmicas calculadas são baseadas nas equações de estados PRSV.

Para determinar uma vazão, comum a todos os 20 fluidos analisados e também suas respectivas pressões de evaporação, onde as características da simulação fossem mantidas, um cálculo de otimização para esse parâmetro deve ser feito. Como este tipo de cálculo de otimização não é o objetivo deste trabalho, a fim de manter tais parâmetros de simulação (expansão de vapor e compressão de líquido apenas, gás liberado no ambiente no ponto de saturação, máximo *pinch point*, etc.) sem que seja feito a otimização mencionada, variou-se a vazão para cada pressão de evaporação de cada um dos fluidos de trabalho, logo os resultados obtidos são os que fazem com que o ciclo trabalhe da forma prevista. O gráfico mostrando a energia específica produzida (kJ/kg de fluido) para o sistema ORC sem torre de resfriamento para cada fluido foi apresentada no APÊNDICE A.

Tabela 4.6 – Características e considerações principais feitas para análise técnica do sistema ORC no presente trabalho.

Gases liberados ao ambiente no ponto de saturação	
Expansão sem condensação na turbina	
Compressão de líquido, apenas	
Variação de temperatura da água de resfriamento no condensador	5 °C
Pressão ambiente	1 atm
Temperatura ambiente	25 °C
Eficiência isentrópica da turbina e da bomba	80%
<i>Pinch Point</i>	10 °C
Temperatura de condensação mínima de simulação	40 °C
Escoamento totalmente desenvolvido dentro do sistema ORC	
Irreversibilidades dentro das tubulações e conexões desprezadas	
Variações nas energias potencial e cinética desprezadas	
Sem perda de carga dentro dos equipamentos	
Sem perda de massa de água no sistema de resfriamento da água de condensação	

## 4.5 Resultados e discussão

A análise realizada no presente trabalho tratou dos principais quesitos técnicos que caracterizam o objetivo da implantação de um sistema ORC, além de alguns outros menos importantes, e comparou-se o comportamento dos diferentes fluido de trabalho, em cada esquema de ORC simulado. São esses quesitos técnicos: as eficiências de Primeira e Segunda Lei, as perdas por irreversibilidades geradas e a vazão de água necessária no condensador.

Foram escolhidos a acetona, o octano e o tolueno, que são três dos fluidos que apresentaram melhores resultados e operam em diferentes faixas de pressão de evaporação, para exemplificar os cálculos.

#### 4.5.1 Potência líquida produzida

É a diferença entre a potência produzida, ou trabalho produzido, na turbina pela consumida na bomba (Equação 4.1). Refere-se ao quanto de energia elétrica será produzida se o sistema for implantado segundo cada modelo estudado. O caso da configuração da planta ORC proposta com a torre de resfriamento é a única que possui uma bomba de água.

$$\dot{W}_{\text{líq}} = \dot{W}_t - \dot{W}_{b,f} - \dot{W}_{b,a} \quad (4.1)$$

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5 mostram a energia elétrica gerada pelos fluidos de trabalho escolhidos como exemplo em cada condição de pressão de evaporação do sistema ORC. Um rápido crescimento na eficiência do ciclo é notado quando as pressões estão ainda baixas. Então, um crescimento, agora suave, acontece quando as pressões aproximam-se das máximas.

Os valores de energia elétrica produzida chegam até, aproximadamente, 165 kW. O fluido capaz de produzir mais energia é o tolueno. Os valores de “ $\dot{W}_{\text{líq}}$ ”, bem como os gráficos gerados, para todas as simulações estão no APÊNDICE A. A máxima potência produzida obtida nas simulações foi para o tolueno (165,27 kW) no ORC sem o sistema de resfriamento da água de condensação, obteve-se um aumento de 19,91% na produção de energia elétrica para o conjunto motor e ORC, quando o motor opera a plena carga, pois há maior aproveitamento do calor produzido no MCI. Para as mesmas condições de simulação, a energia líquida gerada na simulação do ORC com torre de resfriamento foi de 162,03 kW. Nota-se que essa diferença esta, em geral, em torno de 3,5 kW, ou seja, é tão pequena que não seria de grande perda o desprezo dela e, então, tomar os resultados de ambos os sistemas ORC propostos como os mesmos. Isso se repete para os resultados demais resultados.

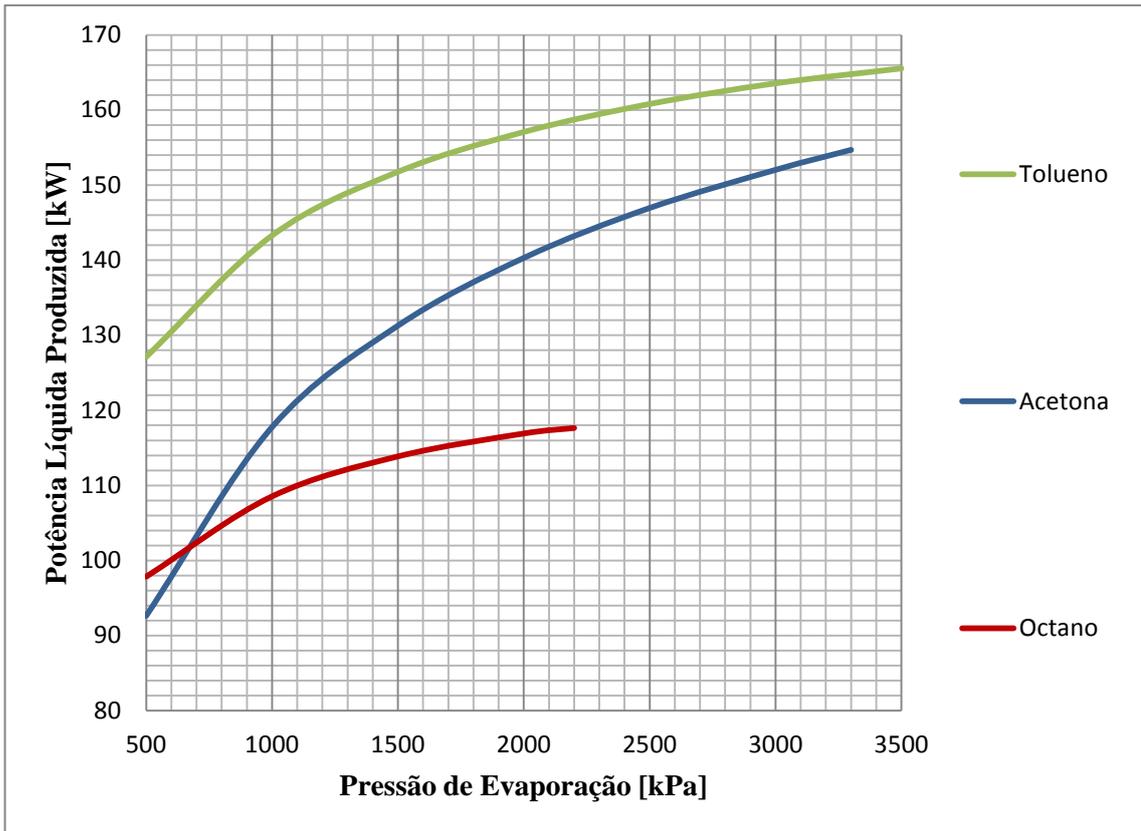


Figura 4.4 – Gráfico da potência líquida produzida pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.

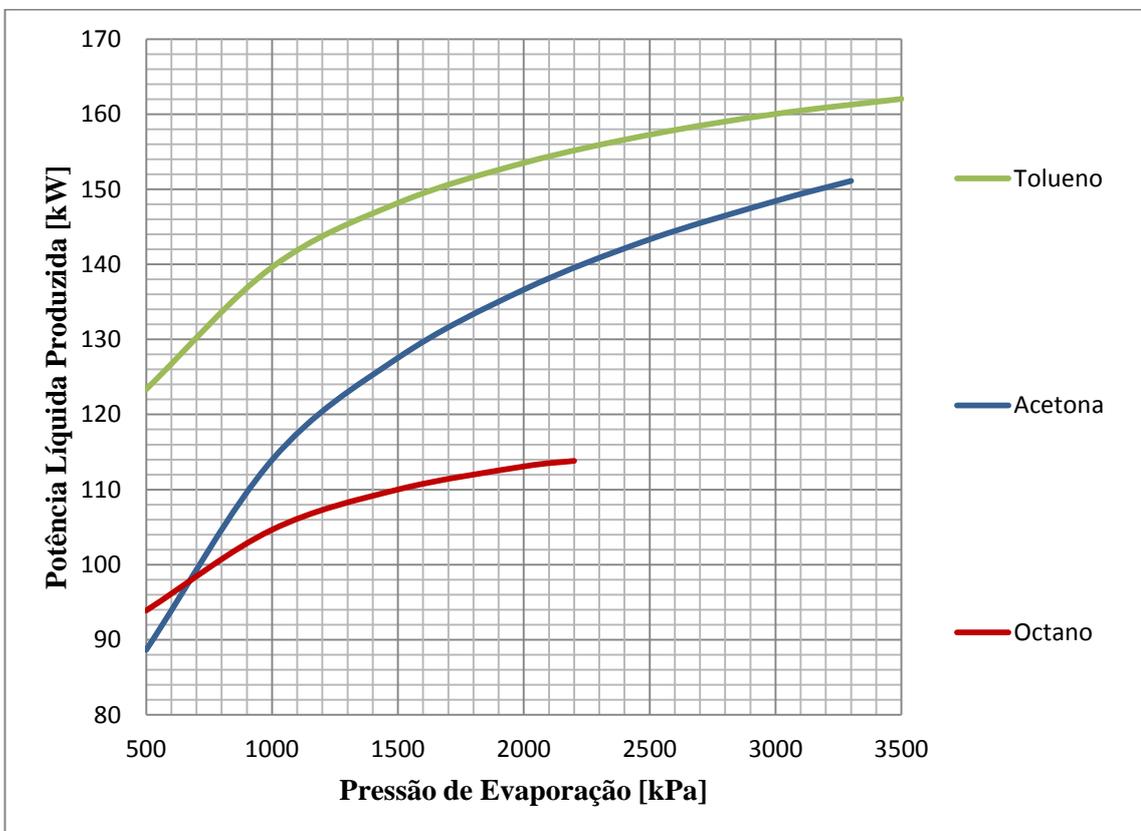


Figura 4.5 – Gráfico da potência líquida produzida pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.

### 4.5.2 Eficiência da Primeira Lei

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os gráficos com curvas de perfis semelhantes às das Figuras 4.4 e 4.5. O cálculo para este quesito foi realizado segundo a Equação 4.2, onde apresenta a razão entre a potência líquida produzida e a energia total disponível nos gases de exaustão do motor. Para tal cálculo o estado final do gás foi considerado o estado de referência ( $T_0$  e  $P_0$ ) e não o estado em que ele deixa o ciclo. Isso, pois, dessa forma entende-se que não há energia alguma a ser aproveitada nesse gás de escape, o que não é o mesmo quando o estado final é tido como o do gás que deixa o ORC.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{líq}}{\Delta \dot{E}_{gás}} \quad (4.2)$$

Os gráficos compreendem valores para a eficiência de Primeira Lei entre, aproximadamente 3 e 6% para os sistemas ORC propostos em operação com os fluidos tomados como exemplo. O tolueno foi o fluido mais eficiente dentre os analisados. O APÊNDICE B mostra todos os resultados obtidos para eficiência de Primeira Lei e os gráficos gerados. Em média a diferença na eficiência de um ciclo para outro esta próxima de 0,12 unidades percentuais para cada fluido e pressão de evaporação simulada, sendo o sistema ORC sem torre de resfriamento que possui maiores eficiências. Percebe-se que a eficiência do ciclo orgânico é baixa, isso, pois, além da fonte de calor ser da faixa de médias temperaturas, há uma grande perda por irreversibilidades no sistema, mas como já mostrado o ganho em produção elétrica é alto com a utilização deste sistema.

### 4.5.3 Irreversibilidades

São varias as irreversibilidades do sistema ORC (maior detalhe vide a sessão 2.4.2 do Capítulo 2). Para efeito de simulação, foram desconsideradas quaisquer perdas por irreversibilidades que aconteceram fora dos equipamentos do ciclo (evaporador, superaquecedor, turbina, condensador e bomba). O cálculo das irreversibilidades nos equipamentos do ciclo segue com bases nas equações apresentadas na sessão 2.4.2 do Capítulo 2 da presente dissertação (Equações 2.7 a 2.12). Depois foi realizada a soma destes resultados para obter a perda total no sistema ORC (Equação 4.3).

$$\dot{I}_{total} = \dot{I}_{evap} + \dot{I}_{sup} + \dot{I}_t + \dot{I}_{cond} + \dot{I}_{b,f} \quad (4.3)$$

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram os gráficos obtidos para a soma da quantidade de perdas por irreversibilidades em cada equipamento, nas várias pressões de evaporação simuladas. As simulações que tiveram, no geral, menores perdas por irreversibilidades nos equipamentos foram, novamente, as com o tolueno como fluido de trabalho. Os valores para essas perdas chegam até, aproximadamente, 200 kW para os fluidos tomados com exemplo e, no melhor dos casos ficam em 125,25 kW (tolueno,  $P_{\text{evap}} = 3.500$  kPa). O APÊNDICE C apresenta os demais valores e gráficos de irreversibilidades nos equipamentos do sistema ORC para as diferentes pressões de evaporação e, também, para os fluidos de trabalho simulados.

#### 4.5.4 Eficiência de Segunda Lei

Neste quesito as curvas dos gráficos gerados, na comparação entre os fluidos de trabalho, apresentam aspectos semelhantes ao da eficiência de Primeira Lei, porém, com valores mais elevados de eficiências (Figuras 4.9 e 4.10).

A eficiência de Segunda Lei representa a quantidade de trabalho produzida em relação à energia fornecida pelo gás de exaustão do motor, que realmente era capaz de ser transformada em trabalho. Em outras palavras é a razão entre o trabalho líquido produzido pelo sistema ORC pela exergia do gás de escape (Equação 4.4). Para tal cálculo, assim como para a eficiência de Primeira Lei, o estado final do gás foi considerado o estado de referência ( $T_0$  e  $P_0$ ) e não o estado em que ele deixa o ciclo. Isso, pois, dessa forma entende-se que não há mais exergia a ser destruída presente nesse gás de escape, o que não é o mesmo quando o estado final é tido como o do gás que deixa o ORC.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{\text{liq}}}{\dot{m}_{\text{gás}} \cdot \Delta e_{\text{gás}}} \quad (4.4)$$

O fluido simulado que produziu maior potência elétrica com a parcela aproveitável da energia do gás de escape do motor foi, assim como nos quesitos anteriores, o tolueno. O gráfico compreende valores para eficiência de Segunda Lei de até, aproximadamente, 56% no melhor dos casos e difere em cerca de 1,3 unidades percentuais a menos de eficiência para o sistema com torre de resfriamento, o que mostra novamente a aproximação que pode ser feita de um sistema para outro em termos de análise técnica. Na verdade, essa diferença é também a diferença média notada para todos os casos simulados. O APÊNDICE D mostra os resultados obtidos com as simulações, para as eficiências de Segunda Lei para cada fluido de trabalho dos sistemas ORC propostos.

#### 4.5.5 Vazão da água de condensação

A eficiência térmica do ciclo também diminuiu devido ao consumo de potência da bomba necessária para circular a água de condensação. Esse consumo é proporcional à vazão de água que passa pelo sistema de resfriamento. Como o ciclo ORC não é alterado com a instalação de um sistema de resfriamento da água de condensação, a quantidade de água no condensador é, praticamente, mesma para ambos os sistemas propostos.

Dentre os quesitos analisados, a vazão de água de resfriamento é o que mostrou menor variação quando alteradas as pressões de evaporação (Figuras 4.11). O menor valor para a vazão de água de resfriamento foi de, aproximadamente, 24 kg/s na simulação com o dodecano como fluido de trabalho e 1.700 kPa como pressão de evaporação, já para os três fluidos em destaque, o resultado mais satisfatório foi de 26,10 kg/s para o tolueno a 3.500 kPa. Todos os valores de vazão de água de condensação obtidos nas simulações dos sistemas ORC estão dispostos no APÊNDICE E.

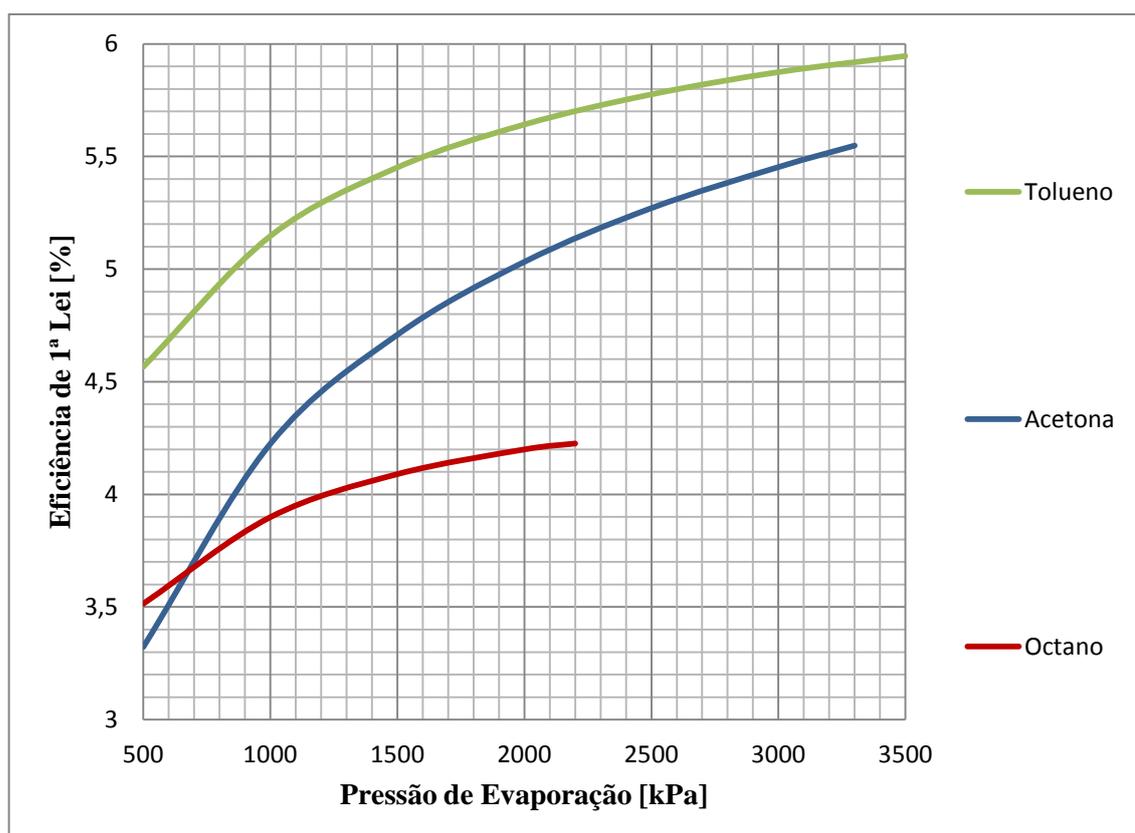


Figura 4.6 – Gráfico da eficiência de 1ª Lei pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.

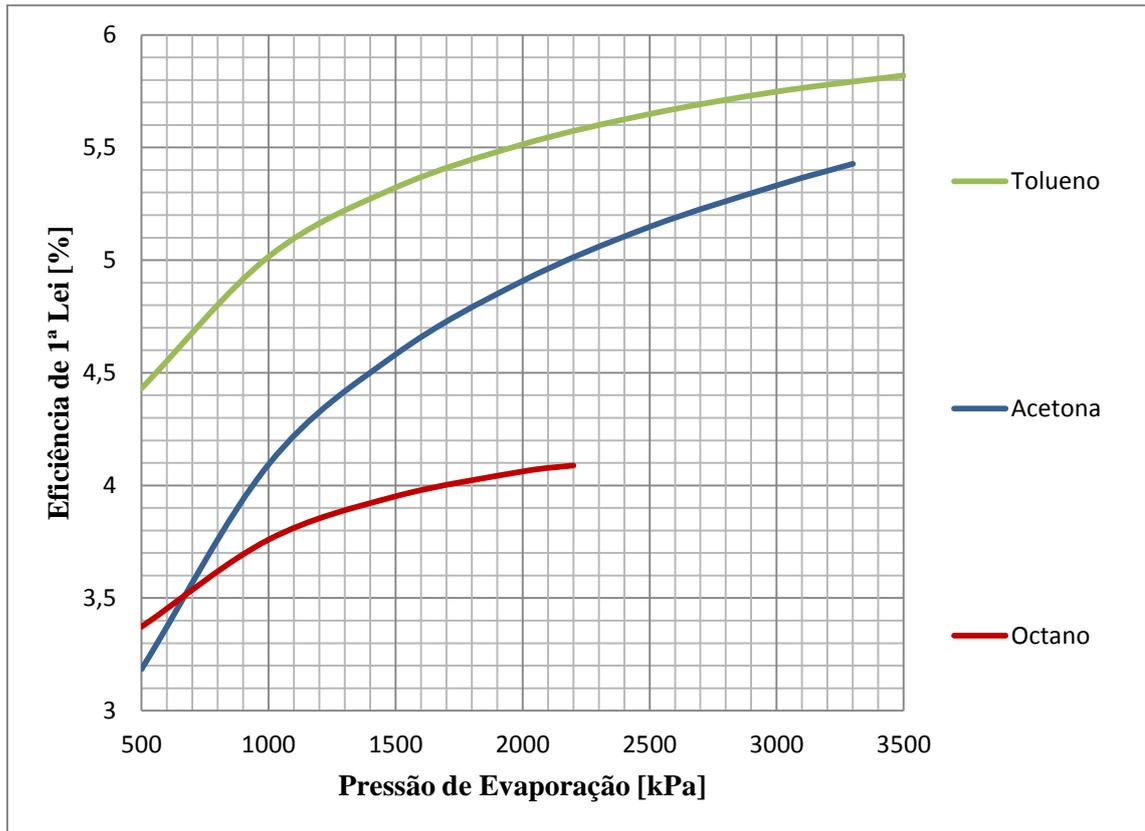


Figura 4.7 – Gráfico da eficiência de 1ª Lei pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.

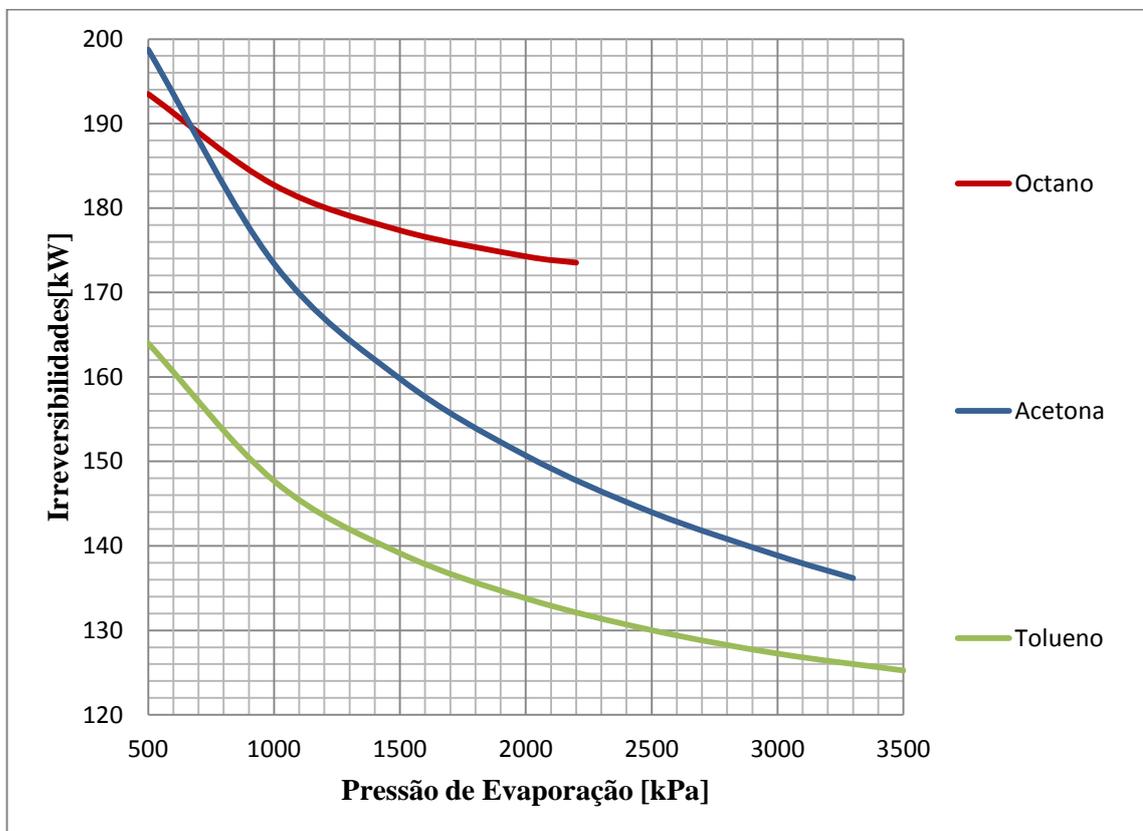


Figura 4.8 – Gráfico das irreversibilidades dos equipamentos pela pressão de evaporação dos sistemas ORC.

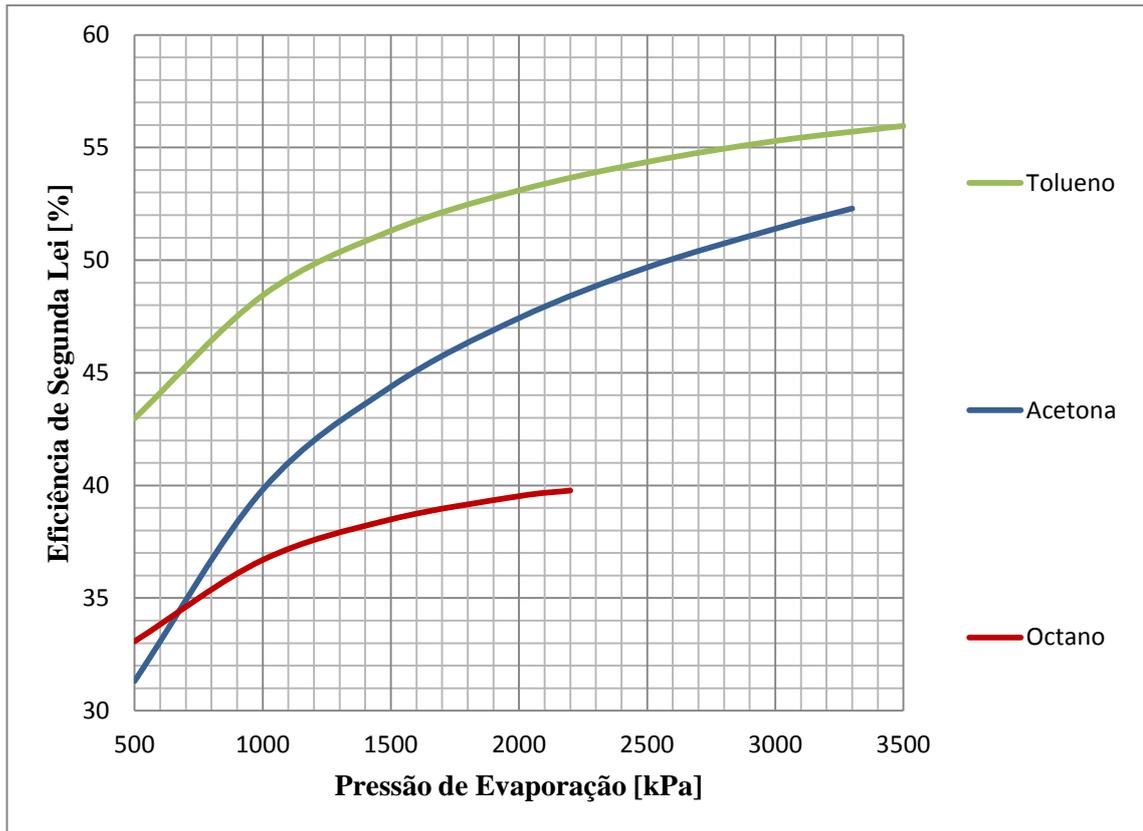


Figura 4.9 – Gráfico da eficiência de Segunda Lei pela pressão de evaporação do ORC com alimentação do condensador pela água da rede.

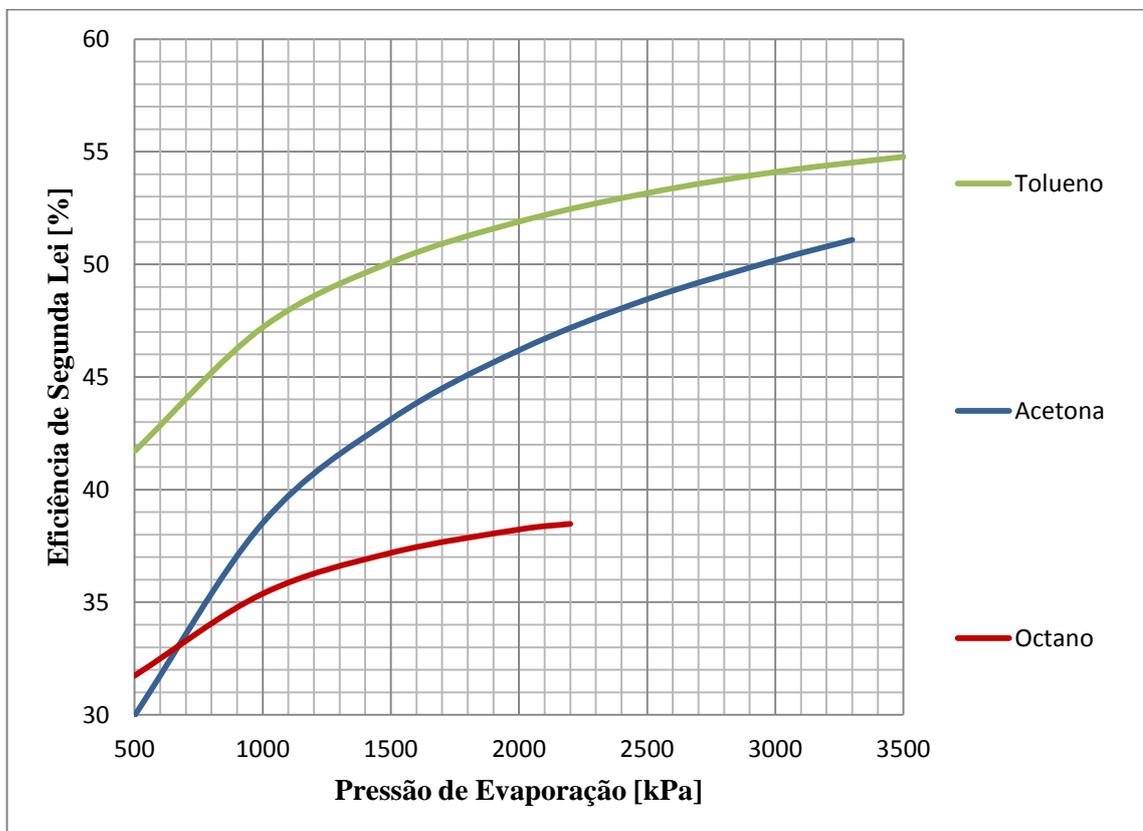


Figura 4.10 – Gráfico da eficiência de Segunda Lei pela pressão de evaporação do ORC com sistema de resfriamento da água de condensação.

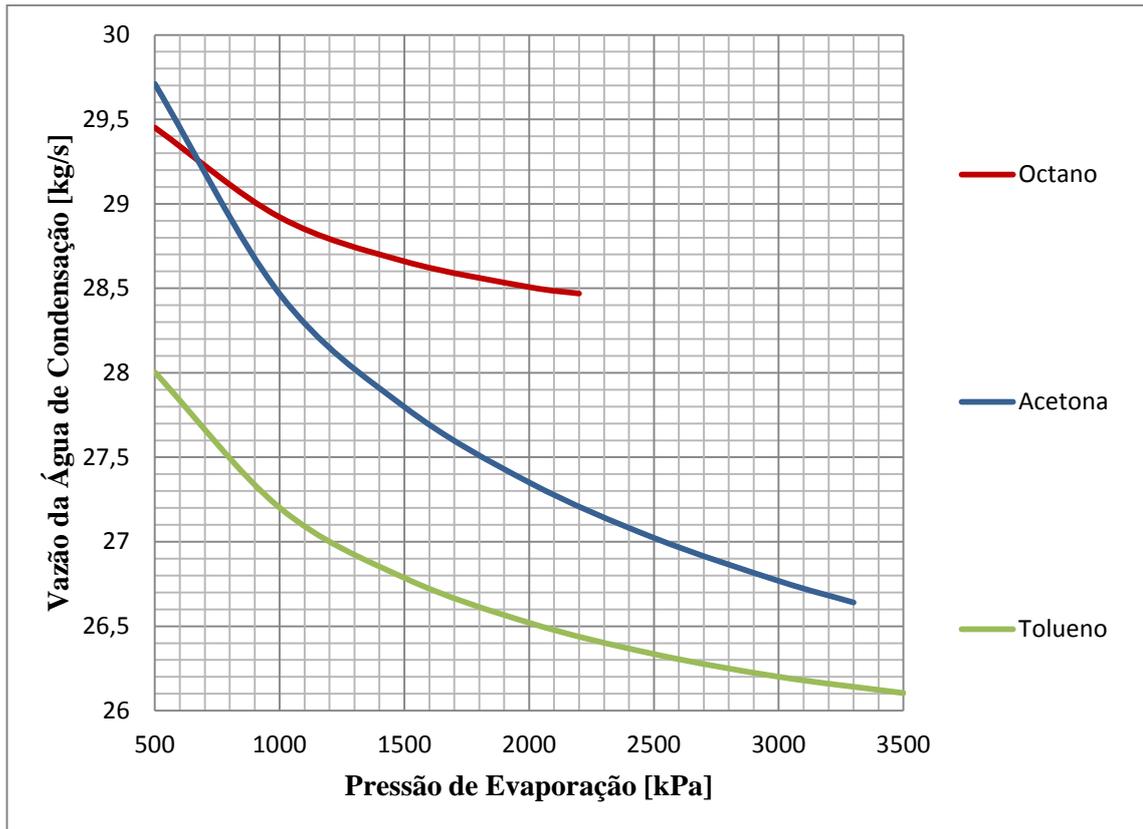


Figura 4.11 – Gráfico das vazões de água de condensação pela pressão de evaporação dos sistemas ORC.

## 5 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo foi apresentado a viabilidade econômica para implementar o sistema ORC proposto. Tal análise foi feita com base no CEPCI, uma ferramenta para cálculos econômicos para plantas energéticas. Tiveram como base os trabalhos de Cayer (2010), Tian (2012), Chew (2014), Le (2014), Mignard (2014), Shu (2014b) e Toffolo (2014), bem como o livro Turton (2008) de onde foram tirados o equacionamento e valores das constantes apresentadas ao decorrer do presente capítulo. O modelo proposto baseia-se no ganho monetário obtido com a produção de energia elétrica pela planta a ORC em relação ao tempo de retorno do investimento.

### 5.1 CEPCI – *Chemical Engineering Plant Cost Index*

O CEPCI é um índice adimensional que atualiza o custo para implantação de uma planta de processos físico-químicos ano após ano. Criado em 1963 e desde então tem sido usado por engenheiros, técnicos e gestores para estimar e avaliar o potencial econômico da implantação de uma unidade energética ou de processamento nas indústrias. Com isso, fazer planejamentos de longo prazo, orçamentos e custos de contratos (Vatavuk, 2002).

Com o avanço das tecnologias e devido às novas tendências de mercado, o CEPCI necessita de ser revisado periodicamente. Este índice na verdade é composto por quatro índices principais que representam os fatores que geram gastos. Tais fatores mostram-se imprescindíveis de serem levados em consideração em uma análise econômica de viabilidade de implantação de uma planta química. São eles:

- I. Equipamentos: é composto por vários sub-índices que representam o custo na compra de determinado equipamento, bem como a instrumentação, montagem e os suportes estruturais que devem ser colocados para instalar tais componentes (trocadores de calor, tanques, tubulação, válvulas, bombas, turbinas, etc);
- II. Trabalho na construção civil: representa o custo com a mão-de-obra empregada em obras de engenharia civil que devem ser feitas para alocar toda a planta química que será instalada;
- III. Prédios: é o fator que representa o custo de investimento com os materiais para construção do ambiente onde será implantada a planta química, bem como o gasto na compra do terreno onde ficará planta.

IV. Engenharia e supervisão: diz respeito aos gastos com o pessoal de engenharia e supervisores que faram todo o projeto e se responsabilizaram por todo o processo de implantação.

Segundo Vatauvuk (2002), o cálculo feito para se chegar ao CEPCI é obtido pela ponderação dos quatro sub-índices. Os valores para cada um deles também é uma ponderação feita com os custos de cada seguimento que compõe cada sub-índice (equipamentos, projeto, construção, montagem, etc). Tais dados são fornecidos pelos produtores desses equipamentos e serviços, são compilados em índices (PPI) e atualizados mensalmente pelo *U. S. Department of Labor's of Labor Statistics* (BLS, Washington D.C.). A interação feita de maneira estatística dos principais PPI, dados pelo BLS, forma os quatro sub-índices e, por consequência, o CEPCI.

Atualmente vários trabalhos fazem o uso do modelo econômico proposto com base no CEPCI (explicado mais adiante na seção 5.3). Cayer (2010), Tian (2012), Chew (2014), Le (2014), Mignard (2014), Shu (2014b) e Toffolo (2014) são exemplos de trabalhos mais recentes que fazem o uso do CEPCI para desenvolver cálculos econômicos em plantas químicas para produção de energia elétrica a partir de ciclos ORC ou Kalina. Assim, por meio desse método, os autores puderam avaliar qual o fluido trabalho e configuração do ciclo é mais rentável para o investidor.

Tanto o CEPCI quanto qualquer outro índice são ferramentas que ajudam os gestores das empresas a fazerem planejamentos. Porém, não devem ser cegamente adotados como o que representa o mercado na realidade. Quando se dispõe de pouco tempo para avaliar a implantação de uma planta química ou o objetivo é implantar o sistema num período posterior, o CEPCI é de grande ajuda, pois consiste em cálculos rápidos e fáceis de serem entendidos, além de representarem bem a realidade dentro de um determinado período de tempo (por volta de 5 anos). Mas se o tempo não for o limitante e estiverem disponíveis os custos reais dos equipamentos e dos outros fatores geradores de gastos, é melhor optar por um tipo de análise mais direta. Assim os resultados obtidos serão o reflexo exato da realidade, e não valores aproximados dela (Vatauvuk, 2002).

## 5.2 Simulação

Verificou-se o quão viável é a implantação do sistema ORC para recuperação do calor residual nos gases de escape do motor CATERPILLAR analisado. Para isso, baseado nos dados técnicos obtidos com as simulações do ciclo no HYSYS, o modelo econômico baseado

no CEPCI foi aplicado. Assim, foi possível obter o custo de investimento, o custo da eletricidade produzida e o tempo de retorno do capital investido (*payback*).

Além dos dados técnicos fornecidos pelo HYSYS (potência produzida, consumo de energia nas bombas, área de troca térmica, etc) foi necessário, para obter-se o ganho na eletricidade produzida, o valor de venda da energia elétrica no Brasil fornecido pela ANEEL.

A verificação da viabilidade econômica na implantação da planta ORC proposta foi feita da seguinte maneira:

- I. Foram simulados os dois modelos de ORC propostos, sem e com torre de resfriamento, no Capítulo 4, Figura 4.2;
- II. As formulações são baseadas no CEPCI e foram utilizados os dados obtidos nas simulações com o HYSYS para suprir algumas das variáveis independentes do sistema;
- III. Constantes de origem construtivas foram obtidas no livro Turton (2008) bem como modelo matemático. Ambos com base no CEPCI;
- IV. Foram analisados os dois modelos de ORC para todos os 20 fluidos de trabalho simulados;
- V. Analisou-se o investimento para as plantas ORC de acordo com as configurações com equipamentos mais baratos possíveis e para os mais caros. Isso para estabelecer o limite superior e inferior do custo da eletricidade. Também para cada modelo de ORC e para cada fluido de trabalho;
- VI. Compararam-se esses custos de eletricidade produzida com o valor de venda da energia elétrica pela ANEEL. Com isso, aliado às taxas de juros, durabilidade do sistema e custos adicionais (manutenção, operação, projeto, etc), foi calculado *payback* para cada caso analisado;
- VII. Feito isso, foi possível expor quais são as configurações de ORC, tanto para o caso com torre quanto para o sem, mais rentáveis para se implementar. Claro, a maior diferença, como esperado, estava no fluido de trabalho a ser utilizado.

### 5.2.1 Custo de investimento

Em primeiro lugar foram calculados os custos de investimento, ou de compra, dos equipamentos do ciclo, que é obtido pela Equação 5.1.

$$C_{BM} = C_p^0 \cdot F_{BM} \quad (5.1)$$

Onde “ $C_p^0$ ” é o custo do equipamento construído com aço carbono que opera em condições de temperatura e pressão ambiente, é obtido a partir dos parâmetros de capacidade ou tamanho do equipamento, dependendo do tipo de dispositivo. “ $F_{BM}$ ” que é o fator de custo do módulo, parâmetro que leva em consideração o material o qual foi fabricado o equipamento. Por fim, o “ $C_{BM}$ ” que é o custo de investimento do equipamento total, que leva em consideração todos os aspectos do dispositivo.

Para obter o “ $C_p^0$ ” foram utilizados as constantes “ $K$ 's”, que representam as constantes obtidas através de correlações entre o tipo de equipamento e sua capacidade ou tamanho, são elas mostradas na Tabela 5.1, bem como a capacidade ou tamanho do equipamento, dependendo do caso. As Equações 5.2 a 5.7 mostram, respectivamente como foram calculados os “ $C_p^0$ ” para a turbina, bombas, evaporador, superaquecedor, condensador e torre de resfriamento.

$$\log C_{p,t}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(W_t) + K_3 \cdot [\log(W_t)]^2 \quad (5.2)$$

$$\log C_{p,b}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(W_b) + K_3 \cdot [\log(W_b)]^2 \quad (5.3)$$

$$\log C_{p,evap}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(A_{evap}) + K_3 \cdot [\log(A_{evap})]^2 \quad (5.4)$$

$$\log C_{p,sup}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(A_{sup}) + K_3 \cdot [\log(A_{sup})]^2 \quad (5.5)$$

$$\log C_{p,cond}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(A_{cond}) + K_3 \cdot [\log(A_{cond})]^2 \quad (5.6)$$

$$\log C_{p,torre}^0 = K_1 + K_2 \cdot \log(V_{torre}) + K_3 \cdot [\log(V_{torre})]^2 \quad (5.7)$$

Tabela 5.1 – Coeficientes “ $K$ 's” referentes ao tamanho ou capacidade e ao tipo de equipamento (Turton, 2008).

Equipamento	$K_1$	$K_2$	$K_3$	Capacidade / Tamanho	Modelo
Turbina	2,2476	1,4965	0,1618	100 – 1.500 [W]	Radial
Condensador	2,7652	0,7282	0,0783	10 – 100 [m <sup>2</sup> ]	Casco e tubo de múltiplos tubos
Bomba de fluido	3,8696	0,3161	0,1220	0,1 – 200 [W]	Alternativa
Evaporador	5,2366	-0,6572	0,3500	10 – 100 [m <sup>2</sup> ]	Casco e tubo de tubo curto
Superaquecedor	2,7652	0,7282	0,0783	10 – 100 [m <sup>2</sup> ]	Casco e tubo de múltiplos tubos
Bomba de água	3,8696	0,3161	0,1220	0,1 – 200 [W]	Alternativa
Torre de resfriamento	3,4974	0,4485	0,1074	0,3 – 520 [m <sup>3</sup> ]	<i>Tray and packed</i>

Logo, os custos de cada equipamento construído com aço carbono com operação em condições de temperatura e pressão ambiente ( $C_P$ 's) podem ser calculados. Os materiais para construção de cada equipamento, sugeridos em Turton (2008), estão descritos na Tabela 5.2 como os que possuem os menores custos até os de maiores custos.

Tabela 5.2 – Materiais para fabricação de cada equipamento (Turton, 2008).

Equipamento	Material	
	Menor custo	Maior custo
Turbina	Aço carbono	Níquel
Condensador	Aço carbono	Titânio
Bomba de fluido	Ferro fundido	Titânio
Evaporador	Aço carbono	Titânio
Superaquecedor	Aço carbono	Titânio
Bomba de água	Ferro fundido	Titânio
Torre de resfriamento	Metal (304 SS)	Polietileno

O cálculo do " $F_{BM}$ " pode ser feito, para os trocadores de calor e as bombas, com o uso da Equação 5.8 e dos coeficientes " $B$ 's", " $F_M$ " e " $F_P$ " que representam, respectivamente, as constantes referentes ao tipo de dispositivo, o fator de material para cada equipamento e o fator de pressão, também diferente para cada equipamento (Tabela 5.3). Já para a turbina, a torre de resfriamento e o evaporador, como não possuem a classificação quanto à pressão, o " $F_{BM}$ " é fornecido diretamente através da Tabela 5.4.

$$F_{BM} = B_1 + B_2 \cdot F_M \cdot F_P \quad (5.8)$$

O coeficiente " $F_P$ " é obtido pela Equação 5.9, onde " $C$ " representam as constantes para cada equipamento que possui sua classificação baseado na pressão (Tabela 5.3). Para os que não apresentam essa classificação (turbina, torre e evaporador) as constantes " $C$ 's" são nulas. " $P$ " é a pressão em que o componente do ORC opera.

$$\log F_P = C_1 + C_2 \cdot \log(P) + C_3 \cdot [\log(P)]^2 \quad (5.9)$$

Assim, com isso e as simulações dos modelos feitas no HYSYS pode-se calcular o custo de investimento, ou de compra, para cada componente de cada configuração dos sistemas ORC propostos.

Esta é a etapa a qual foi aplicado o conceito de CEPCI, explicado anteriormente na seção 5.2 do presente capítulo. Os valores para todos os coeficientes ( $K$ 's,  $B$ 's,  $C$ 's,  $F_M$  e  $F_{BM}$ ) foram estabelecidos com base no CEPCI do ano de 2001 ( $CEPCI_{2001} = 397$ , Turton et al.

(2008)). Logo, é necessária a conversão dos resultados para os tempos atuais. Como o cálculo do CEPCI é feito com atraso de um ano, os resultados da análise econômico obtidos neste trabalho são os referentes à Setembro de 2014 ( $CEPCI_{Set/2014} = 575,4$ , Chemical Engineering (2015)).

Primeiro foi obtido o custo total de investimento para implantação da planta ORC no ano de 2001 ( $Custo_{2001}$ ). Para isso, somaram-se todos os custos de compra de cada componente do ciclo (Equação 5.10). Vale lembrar que para a configuração do ORC sem a torre de resfriamento, tanto o custo da torre “ $C_{BM,torre}$ ” quanto o da bomba de água “ $C_{BM,b,a}$ ”.

$$Custo_{2001} = C_{BM,t} + C_{BM,evap} + C_{BM,sup} + C_{BM,cond} + C_{BM,b,f} + C_{BM,torre} + C_{BM,b,a} \quad (5.10)$$

Para atualizar o custo de investimento total da planta em 2001 para Setembro de 2014 deve-se multiplica-lo pela razão entre os respectivos CEPCI de cada período. Como mostrado na Equação 5.11.

$$Custo_{Set/2014} = Custo_{2001} \cdot \frac{CEPCI_{Set/2014}}{CEPCI_{2001}} \quad (5.11)$$

Tabela 5.3 – Coeficientes e constantes necessários para o cálculo dos parâmetros “ $F_P$ ” e “ $F_{BM}$ ”, tanto dos trocadores de calor quanto das bombas (Turton, 2008).

Equipamento	Classificação (pressão)	Material	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$B_1$	$B_2$	$F_M$
Condensador	$P < 40$ bar	Aço carbono	0	0	0	1,74	1,55	1
Condensador	$P < 40$ bar	Titânio	0	0	0	1,74	1,55	11,4
Superaquecedor	$P < 40$ bar	Aço carbono	0	0	0	1,74	1,55	1
Superaquecedor	$P < 40$ bar	Titânio	0	0	0	1,74	1,55	11,4
Bomba de fluido	$P < 11$ bar	Ferro fundido	0	0	0	1,89	1,35	1
Bomba de fluido	$P < 11$ bar	Titânio	0	0	0	1,89	1,35	6,4
Bomba de fluido	$11 < P < 101$ bar	Ferro fundido	-0,245	0,259	-0,014	1,89	1,35	1
Bomba de fluido	$11 < P < 101$ bar	Titânio	-0,245	0,259	-0,014	1,89	1,35	6,4
Bomba de água	$11 < P < 101$ bar	Ferro fundido	-0,245	0,259	-0,014	1,89	1,35	1
Bomba de água	$11 < P < 101$ bar	Titânio	-0,245	0,259	-0,014	1,89	1,35	6,4

Tabela 5.4 – Parâmetro “F<sub>BM</sub>” para a turbina, evaporador e torre de resfriamento (Turton, 2008).

<b>Equipamento</b>	<b>Material</b>	<b>F<sub>BM</sub></b>
Turbina	Aço carbono	2,2
Turbina	Níquel	11,6
Evaporador	Aço carbono	3
Evaporador	Titânio	14,5
Torre	Polietileno	1
Torre	304 SS	7

### 5.2.2 Custo da eletricidade produzida (EPC – *Electricity Production Cost*)

A facilidade na conversão do custo de um período para outro, sem perda de precisão, é um dos grandes atrativos deste modelo econômico. Com isso, ao adicionar a taxa anual de juros “i” que o investimento é sujeito e, também, o tempo de operação da planta em anos (período de amortização) “t”, foi calculado a anuidade “A” (Equação 5.12).

$$A = \text{Custo}_{\text{Set}/2014} \cdot \left[ \frac{i \cdot (1+i)^t}{(1+i)^t - i} \right] \quad (5.12)$$

Por fim, o EPC é calculado como mostrado na Equação 5.13. Onde “f” representa o custo com operação, manutenção e seguro da instalação que, segundo Tian (2012), vale 1,65% do custo total da planta. “H” é a quantidade em horas por ano de funcionamento do sistema, foi adotado 7500 h/ano para que fossem contabilizadas as paradas necessárias para manutenção do sistema (Tian, 2012). O cálculo também leva em consideração a energia líquida produzida pelo ORC.

$$\text{EPC} = \frac{A + f \cdot \text{Custo}_{\text{Set}/2014}}{W_{\text{liq}} \cdot H} \quad (5.13)$$

### 5.2.3 Tempo de retorno do investimento – *Payback*

Para descobrir quanto tempo os investimentos a serem feitos nos sistemas ORC propostos irá ser reposto, primeiro é necessário avaliar como está o mercado de venda de energia elétrica em termos de preços. Segundo a ANEEL (ANEEL – Agência Nacional de Energia elétrica (2015)), o preço médio de venda da energia elétrica pelas indústrias para a ANEEL na região Sudeste, região escolhida para a análise em questão, é de 0,38726 R\$/kWh (0,10475 US\$/kWh – cotação do dólar para o dia 21/11/2015 as 11h20m).

Logo, a diferença entre o valor fornecido pela ANEEL para o preço de venda da energia elétrica às residências e o EPC é, então, o ganho obtido pela planta ORC (“G”,

Equação 5.14). Vale lembrar que esse ganho assumirá valores negativos, ao variarem-se os anos em que o sistema ORC será usado, até o momento em que o investimento seja pago (payback), tudo desse ponto em diante entende-se como lucro obtido ao implementar um dos sistemas ORC propostos. Quanto maior for o período de amortização, ou seja, o tempo que a planta está em operação, mais rápido acontece o retorno financeiro.

$$G = \text{Preço}_{\text{ANEEL}} - \text{EPC} \quad (5.14)$$

### 5.3 Exemplo de cálculos

A seguir será mostrado um exemplo de como foi feito o procedimento da análise econômica descrita na Seção 5.3. Tomou-se o caso da acetona com pressão de evaporação de 3.300 kPa, no sistema ORC com água de condensação vinda diretamente da rede urbana. Na Tabela 5.5 estão todos os parâmetros, do caso em questão, utilizados nos cálculos.

Tabela 5.5 – Parâmetro “ $F_{\text{BM}}$ ” para a turbina, evaporador e torre de resfriamento (Turton, 2008).

<b>Potência produzida (<math>W_t</math>)</b>	157,80 kW
<b>Potência consumida (<math>W_b</math>)</b>	3,11 kW
<b>Área de troca térmica (<math>A_{\text{evap}}</math>, <math>A_{\text{sup}}</math> e <math>A_{\text{cond}}</math>)</b>	60,32 m <sup>2</sup>
<b>Pressão do equipamento (<math>P_{\text{sup}}</math>, <math>P_{\text{cond}}</math> e <math>P_{\text{b,f}}</math>)</b>	3.300 kPa

Assim, das Equações 5.2 a 5.6 e da Tabela 5.1 tem-se o custo do equipamento construído com aço carbono que opera em condições de temperatura e pressão ambiente:

$$\begin{aligned} \log C_{p,t}^0 &= K_{1,t} + K_{2,t} \cdot \log(W_t) + K_{3,t} \cdot [\log(W_t)]^2 \\ &= 2,2476 + 1,4965 \cdot \log(157,80) \\ &\quad - 0,1618 \cdot [\log(157,80)]^2 = 4,7553; \end{aligned}$$

$$\text{Logo: } C_{p,t}^0 = \text{US\$ } 56.924,89$$

Analogamente para o resto dos equipamentos:

$$C_{p,b,f}^0 = \text{US\$ } 11.354,17$$

$$C_{p,\text{evap}}^0 = \text{US\$ } 149.967,00$$

$$C_{p,\text{sup}}^0 = \text{US\$ } 20.414,85$$

$$C_{p,\text{cond}}^0 = \text{US\$ } 20.414,85$$

Agora, foram calculados os fatores de pressão, para os equipamentos classificados quanto a esse parâmetro, com o uso da Tabela 5.3 e da Equação e 5.9:

$$\begin{aligned}\log F_{P,\text{sup}} &= C_{1,\text{sup}} + C_{2,\text{sup}} \cdot \log(P_{\text{sup}}) + C_{3,\text{sup}} \cdot [\log(P_{\text{sup}})]^2 \\ &= 0 + 0 \cdot \log(3.300) + 0 \cdot [\log(P_{\text{sup}}3.300)]^2 = 0; \quad \text{Logo: } \mathbf{F_{P,\text{sup}} = 1,0}\end{aligned}$$

Analogamente para o condensador e para a bomba de fluido:

$$\mathbf{F_{P,\text{cond}} = 1,0}$$

$$\mathbf{F_{P,\text{b,f}} = 3,1422}$$

Logo, com base na Equação 5.8 e nas Tabelas 5.2 e 5.3, puderam ser calculados os fatores de pressão de custo de módulo ou equipamento para o superaquecedor, condensador e bomba de fluido:

$$\mathbf{F_{BM,\text{sup}}(\text{Aço carbono})} = B_{1,\text{sup}} + B_{2,\text{sup}} \cdot F_{M,\text{sup}} \cdot F_{P,\text{sup}} = 1,74 + 1,55 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{3,29}$$

Analogamente para os outros componentes:

$$\mathbf{F_{BM,\text{sup}}(\text{Titânio}) = 19,41}$$

$$\mathbf{F_{BM,\text{cond}}(\text{Aço carbono}) = 3,29}$$

$$\mathbf{F_{BM,\text{cond}}(\text{Titânio}) = 19,41}$$

$$\mathbf{F_{BM,\text{b,f}}(\text{Ferro fundido}) = 6,1319}$$

$$\mathbf{F_{BM,\text{b,f}}(\text{Titânio}) = 29,0384}$$

Para a turbina e o evaporador, os valores de “F<sub>BM</sub>” são dados diretamente pela Tabela 5.4. Com isso pode, agora, ser calculado o custo de investimento para cada equipamento (Equações 5.1 e 5.10), bem como para a planta ORC:

$$\mathbf{C_{BM,\text{sup}}(\text{Aço carbono})} = C_{p,\text{sup}}^0 \cdot F_{BM,\text{sup}} = 20.414,85 \cdot 3,29 = \mathbf{US\$ 67.164,86}$$

$$\mathbf{C_{BM,\text{sup}}(\text{Titânio}) = US\$ 396.252,31}$$

$$\mathbf{C_{BM,\text{cond}}(\text{Aço carbono}) = US\$ 67.164,86}$$

$$\mathbf{C_{BM,\text{cond}}(\text{Titânio}) = US\$ 396.252,31}$$

$$\mathbf{C_{BM,\text{b,f}}(\text{Ferro fundido}) = US\$ 69.623,08}$$

$$\mathbf{C_{BM,\text{b,f}}(\text{Titânio}) = US\$ 329.707,07}$$

$$C_{BM,t}(\text{Aço carbono}) = \text{US\$ } 125.234,76$$

$$C_{BM,t}(\text{Níquel}) = \text{US\$ } 660.328,74$$

$$C_{BM,evap}(\text{Aço carbono}) = \text{US\$ } 449.901,00$$

$$C_{BM,evap}(\text{Titânio}) = \text{US\$ } 2.174.521,52$$

$$\text{Custo}_{2001} = C_{BM,sup} + C_{BM,cond} + C_{BM,b,f} + C_{BM,t} + C_{BM,evap}$$

Com isso, o custo total de investimento, no ano de 2001, desse sistema ORC analisado fica no intervalo de US\$ 779.088,58 até US\$ 3.957.061,95. Vale lembrar que o CEPCI em 2001 é de 397 e o de Setembro de 2014 de 575,4. Então, pela Equação 5.11, temos o custo total de investimento, em Setembro de 2014, entre, em dólares e em reais:

$$\text{Custo}_{\text{Set}/2014} = \text{US\$ } 537.535,92 \quad \text{e} \quad \text{Custo}_{\text{Set}/2014} = \text{US\$ } 2.730.193,94$$

$$\text{Custo}_{\text{Set}/2014} = \text{R\$ } 1.987.270,30 \quad \text{e} \quad \text{Custo}_{\text{Set}/2014} = \text{R\$ } 10.093.527,00$$

Foi considerada a taxa anual de juros do Banco Mundial igual a 12% ( $i = 0,12$ ), o fator de manutenção e operação “f” como 0,0165, a vida útil do sistema “t” sendo de 20 anos e o tempo de funcionamento da planta  $H = 7.500$  h/ano. Assim, pelas Equações 5.12 e 5.13, respectivamente, foram calculados o fator de anuidade e o custo da eletricidade produzida (EPC) para as configurações de menor e maior custo da planta ORC.

**A (menor custo)**

$$\begin{aligned} &= \text{Custo}_{\text{Set}/2014} \times \left[ \frac{i \times (1+i)^{\text{tempo}}}{(1+i)^{\text{tempo}} - i} \right] \\ &= 537.535,92 \times \left[ \frac{0,12 \cdot (1+0,12)^{20}}{(1+0,12)^{20} - 0,12} \right] \\ &= \mathbf{65.316,85} \quad \text{e} \quad \mathbf{A \text{ (maior custo)} = 331.750,25} \end{aligned}$$

**EPC (menor custo)**

$$\begin{aligned} &= \frac{A + f \times \text{Custo}_{\text{Set}/2014}}{W_{liq} \times H} \\ &= \frac{65.316,85 + 0,0165 \times 537.535,92}{(157,80 - 3,11) \times 7.500} \\ &= \mathbf{0,06 \text{ US\$/kWh}} \quad \text{e} \quad \mathbf{EPC \text{ (maior custo)} = 0,32 \text{ US\$/kWh}} \end{aligned}$$

$$\mathbf{EPC \text{ (menor custo)} = 0,22 \text{ R\$/kWh}} \quad \text{e} \quad \mathbf{EPC \text{ (maior custo)} = 1,18 \text{ R\$/kWh}}$$

Por fim, seja a média de preço de venda da energia elétrica na região Sudeste é igual a 0,38726 R\$/kWh, então o ganho, em reais, com a planta ORC (Equação 5.14) é de, aproximadamente, **0,17 R\$/kWh** para a configuração de menor custo. Já para o sistema ORC maior custo não houve lucro e sim um prejuízo por volta de **0,79 R\$/kWh**.

Desta forma foram feitas as análises econômicas do presente trabalho. Foram variados os fluidos de trabalho, a configuração do ORC, as pressões de evaporação, as taxas de juros e o tempo de vida útil da planta. Os resultados mais expressivos para tais análises podem ser vistos na seção 5.5.

## 5.4 Resultados e discussão

Os resultados obtidos focaram no investimento inicial, custo da eletricidade (EPC) e tempo de retorno financeiro (*payback*) para: as duas configurações de ORC sugeridas (com e sem torre de resfriamento), os 20 fluidos de trabalho analisados e as várias pressões de evaporação que eles são capazes de operar. Tanto quanto para o sistema com condensador alimentado com água da rede hídrica de uma cidade, quanto para o que faz uso de uma torre de resfriamento observou-se que os mesmos fluidos se destacaram nos quesitos analisados. Nesta seção, foram apresentados os resultados referentes a três fluidos orgânicos que estão dentre os que mais se destacaram, são eles: tolueno acetona e octano.

O capital de investimento, o custo da eletricidade produzida e o *payback* são referentes ao período de Setembro de 2014. Vale lembrar, da seção 5.2 que o modelo econômico baseado no CEPCI pode ser adotado, sem grandes erros, por um período de até cinco anos (Vatavuk, 2002). Assim, os resultados apresentados nesta seção podem ser adotados em uma análise de viabilidade econômica de uma planta ORC para produção de energia elétrica, a partir do MCI em questão, com implantação prevista para até Setembro de 2019.

### 5.4.1 Configuração do sistema ORC sem torre de resfriamento

O capital investido na compra dos equipamentos que compõem o sistema ORC que opera com acetona, octano e tolueno, está entre R\$ 1.747.873,33 e R\$ 10.234.870,83, como pode ser visto na Tabela 5.6.

As Figuras 5.1 a 5.3 mostram os custos da eletricidade produzida (EPC) em R\$/kWh para o sistema em operação com cada um desses três fluidos de trabalho em função do tempo de vida útil, ou período de amortização, da planta ORC ( $t = 1$  a 20 anos) e para cada uma das pressões de evaporação que foram simulados os sistemas. Esses gráficos representam os

cálculos feitos para uma taxa de juros de 12%, mas foi simulado o EPC também para 8, 10, 14 e 16% onde o custo da energia elétrica produzida teve um aumento contínuo de, em média, 1,85%, de uma taxa de juros para outra, quando “ $t = 1$  ano” até 12,5% para “ $t = 20$  anos”, de maneira geral.

Os tempos de retorno de capital (*payback*), como explicado na seção 5.3.3, estão mostrados nas Figuras 5.4 a 5.6. Os gráficos estão em função do ganho na venda da eletricidade produzida (Equação 5.14) e do tempo de vida útil da planta ORC, estipulado em 20 anos. Esses gráficos representam os cálculos feitos para uma taxa de juros de 12%, mas foi simulado o *payback* também para 8, 10, 14 e 16% onde de um valor de “ $i$ ” para outro, respectivamente, o tempo de retorno do capital investido aumentou, de maneira constante, em média 5 meses quando o fluido de trabalho era a acetona, 8 meses para o octano e em 4,5 meses para o tolueno. Vale lembrar que quando o gráfico de determinado fluido de trabalho, pressão de evaporação, configuração de ORC e taxa de juros atinge o eixo da abscissa, nesse instante representa o momento em que o investimento em tal sistema ORC foi reavido. Deste ponto de *payback* em diante o que se observe é o lucro ganho com a implantação da planta.

Para efeito de comparação, as Figuras 5.7 a 5.9 mostram o ganho na venda da energia elétrica produzida em função hora da taxa de juros, hora das pressões de evaporação para seis casos analisados. Ainda, a Figura 5.10 expressa a diferença nos ganhos e no tempo de retorno de investimento entre esses três fluidos de trabalho (acetona, octano e tolueno), para um caso específico de mesma taxa de juros e pressão de evaporação ( $i = 12\%$  e  $P_{\text{evap}} = 2.000$  kPa).

Tabela 5.6 – Custo de investimento da planta ORC analisada sem torre de resfriamento.

<b>Fluidos de trabalho</b>	<b>Pressão de evaporação [kPa]</b>	<b>Potência líquida [kW]</b>	<b>Configuração mais barata [R\$]</b>	<b>Configuração mais cara [R\$]</b>
Tolueno	500	127,12	1.812.259,89	9.160.262,50
	1.000	143,28	1.851.502,93	9.344.628,86
	1.500	151,77	1.927.972,67	9.789.384,38
	2.000	157,07	1.955.161,77	9.928.735,38
	2.500	160,80	1.977.956,89	10.045.701,25
	3.000	163,55	1.997.688,27	10.147.156,99
	3.500	165,54	2.014.690,08	10.234.870,83
Acetona	500	92,63	1.747.873,33	8.824.362,44
	1.000	117,77	1.806.181,65	9.109.131,61
	1.500	131,27	1.890.828,58	9.595.705,01
	2.000	140,30	1.924.325,60	9.768.355,60
	2.500	146,95	1.951.673,80	9.909.448,59
	3.000	152,03	1.974.757,09	10.028.727,49
	3.300	154,69	1.987.270,28	10.093.527,00
Octano	500	97,85	1.758.959,66	8.880.546,80
	1.000	108,54	1.790.305,96	9.024.236,28
	1.500	113,86	1.860.976,25	9.438.019,79
	2.000	116,91	1.884.032,96	9.556.110,96
	2.200	117,65	1.891.628,52	9.595.112,52

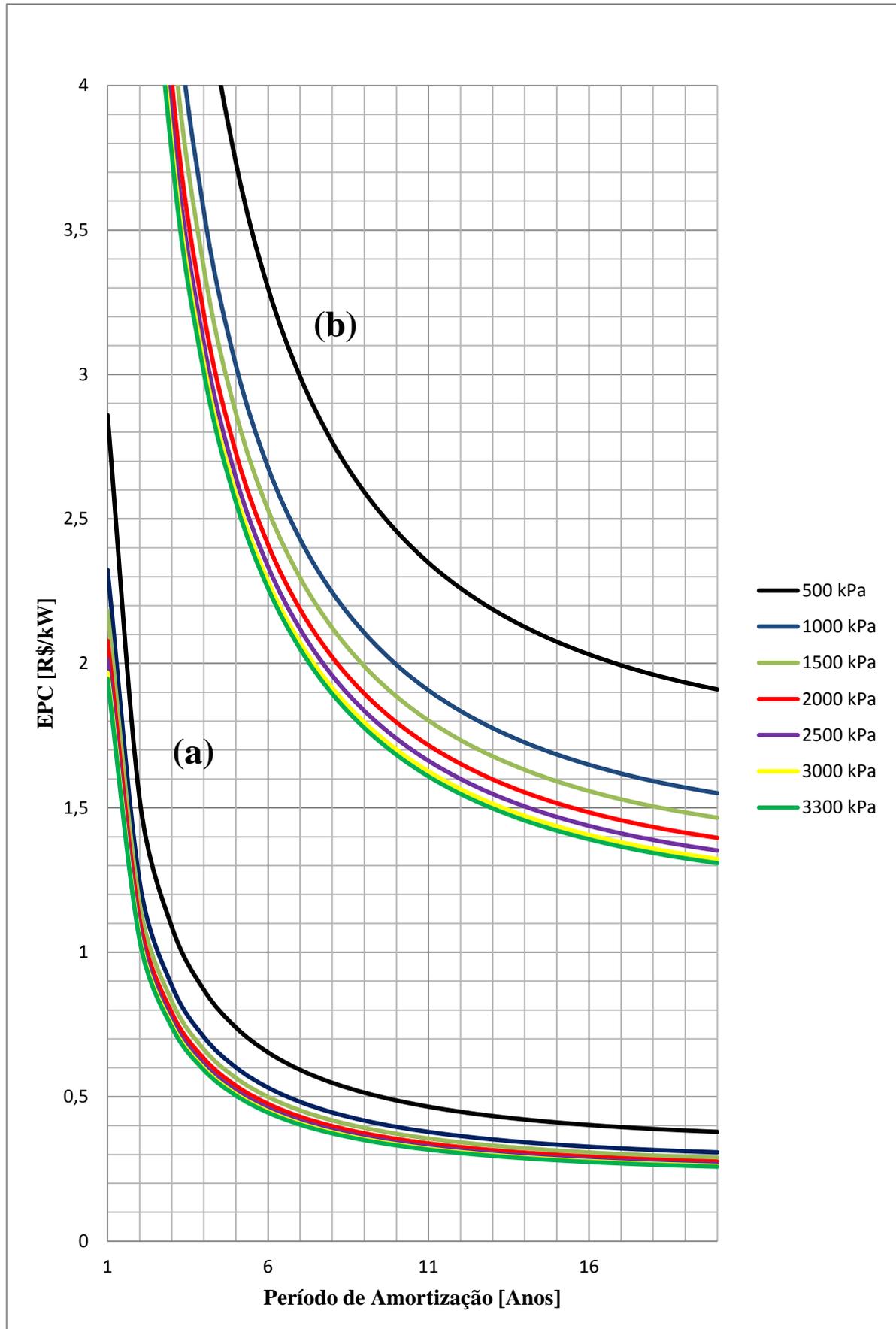


Figura 5.1 – Gráfico do EPC com acetona como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

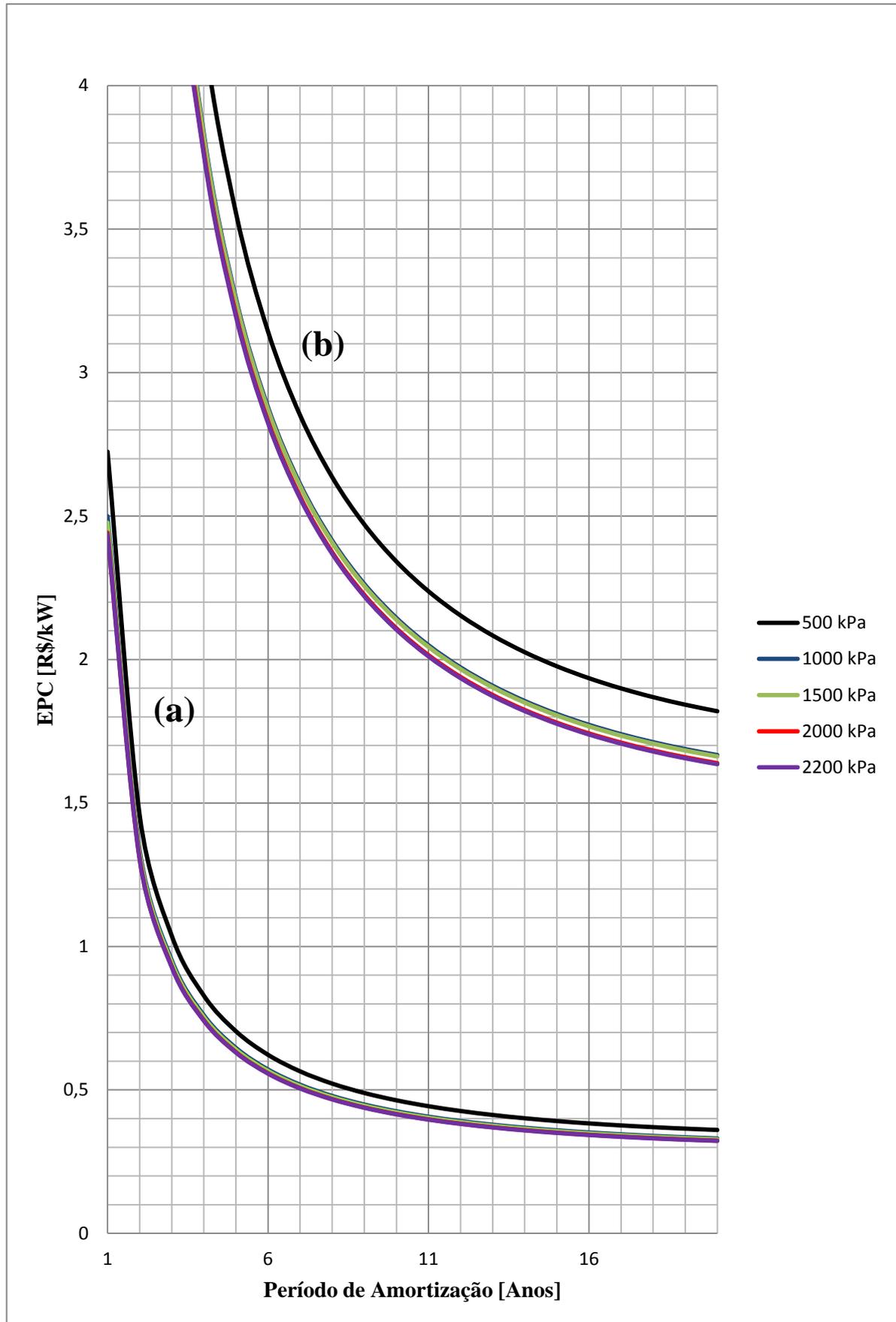


Figura 5.2 – Gráfico do EPC com octano como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

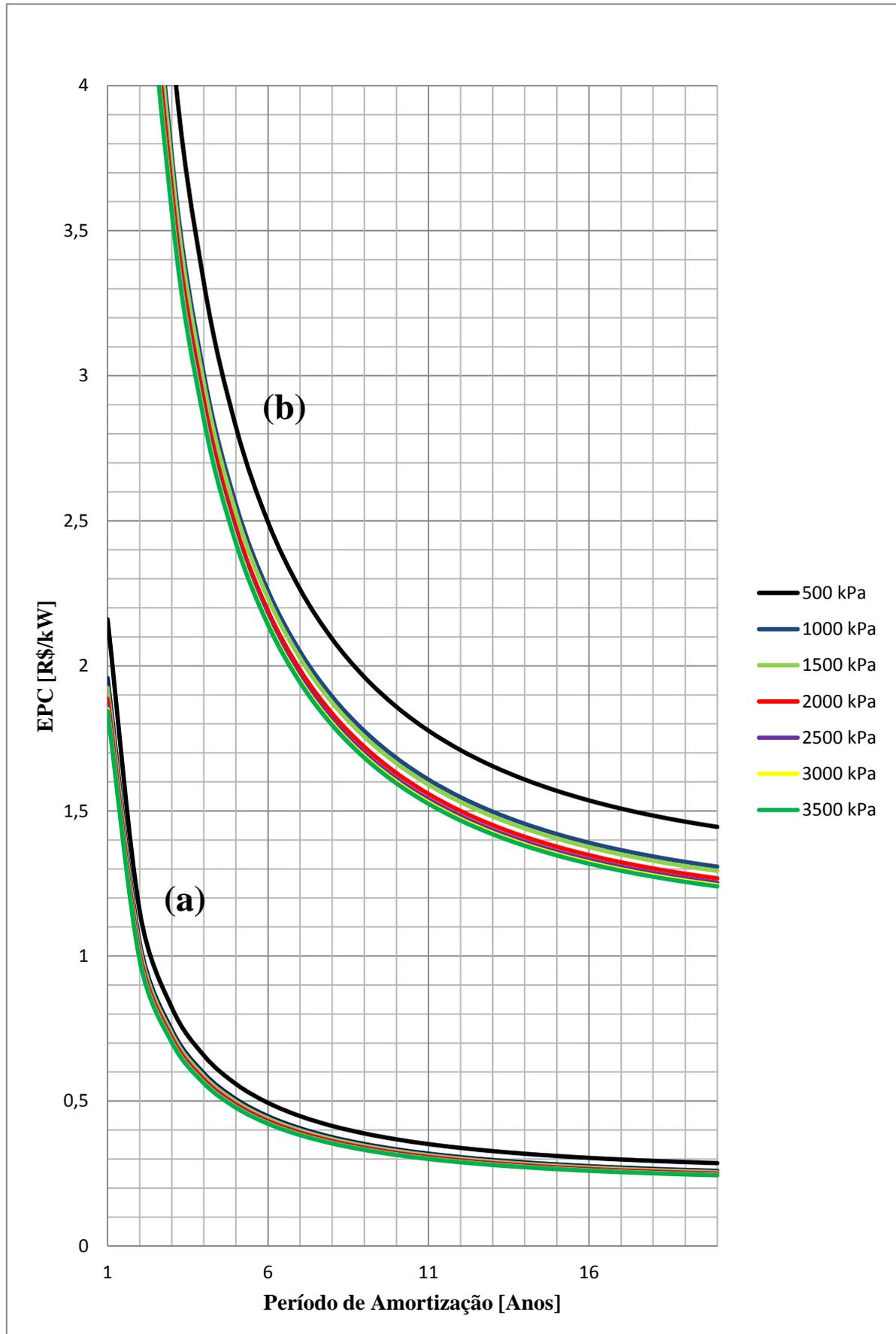


Figura 5.3 – Gráfico do EPC com tolueno como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

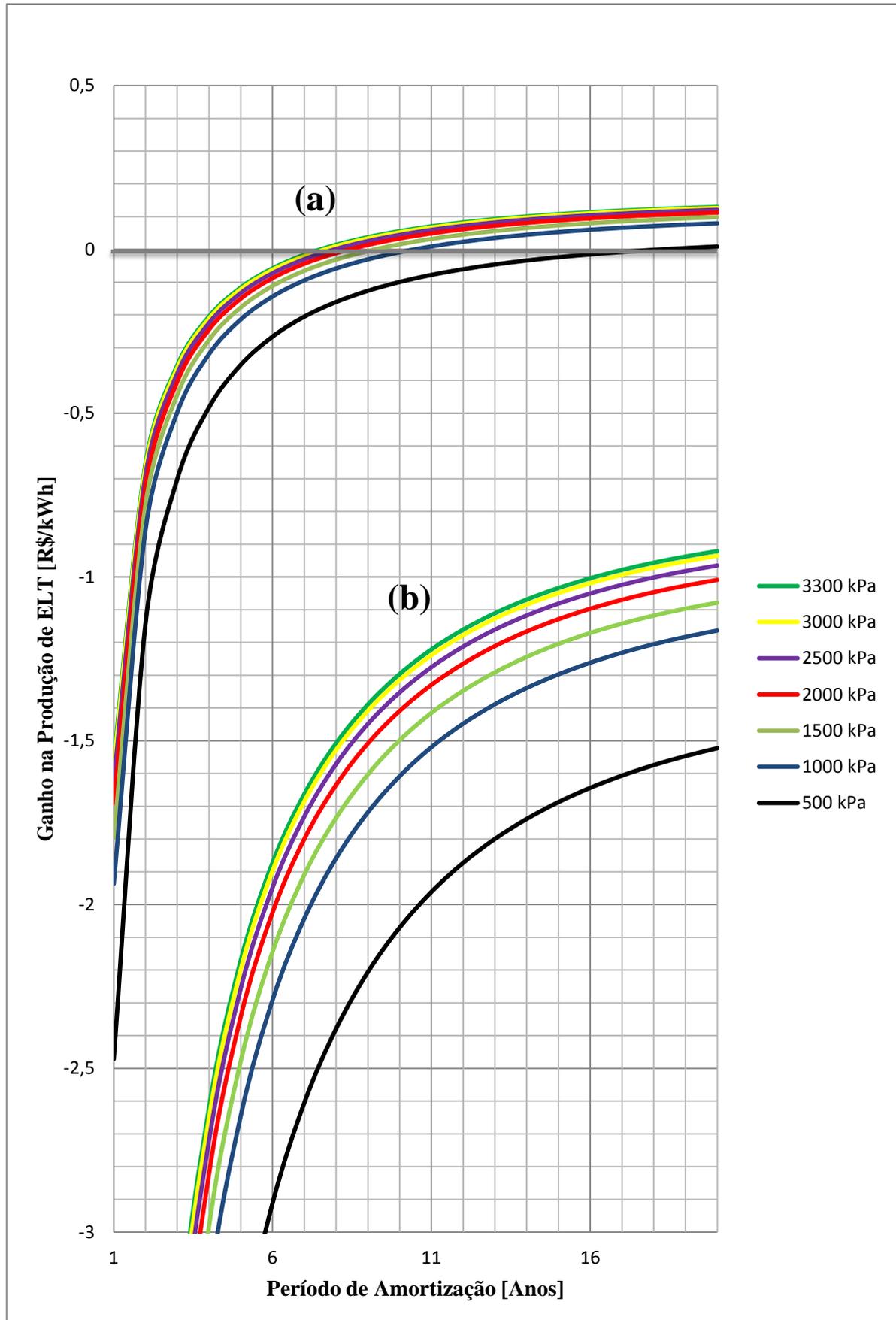


Figura 5.4 – Gráfico do *Payback* com acetona como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

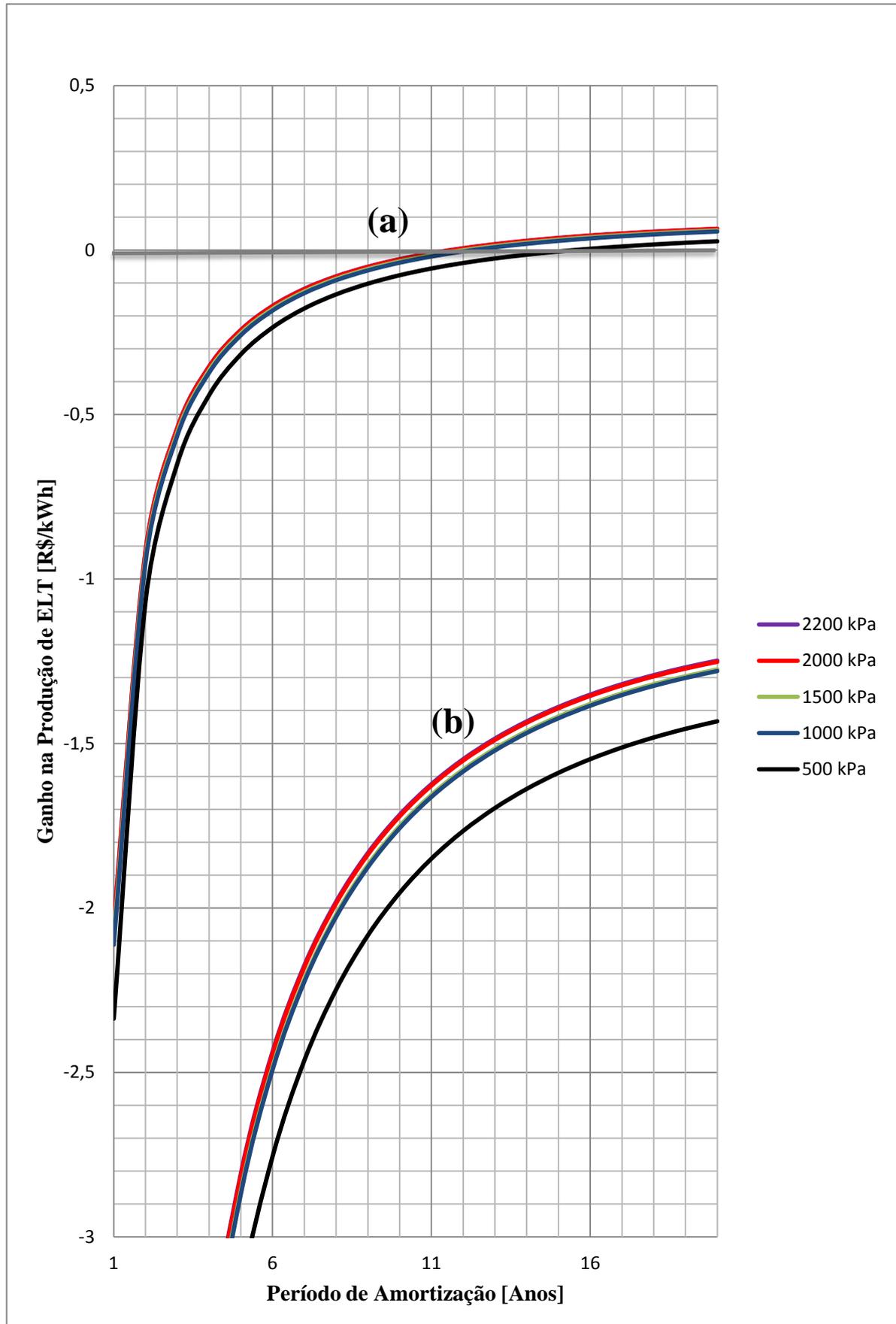


Figura 5.5 – Gráfico do *Payback* com octano como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

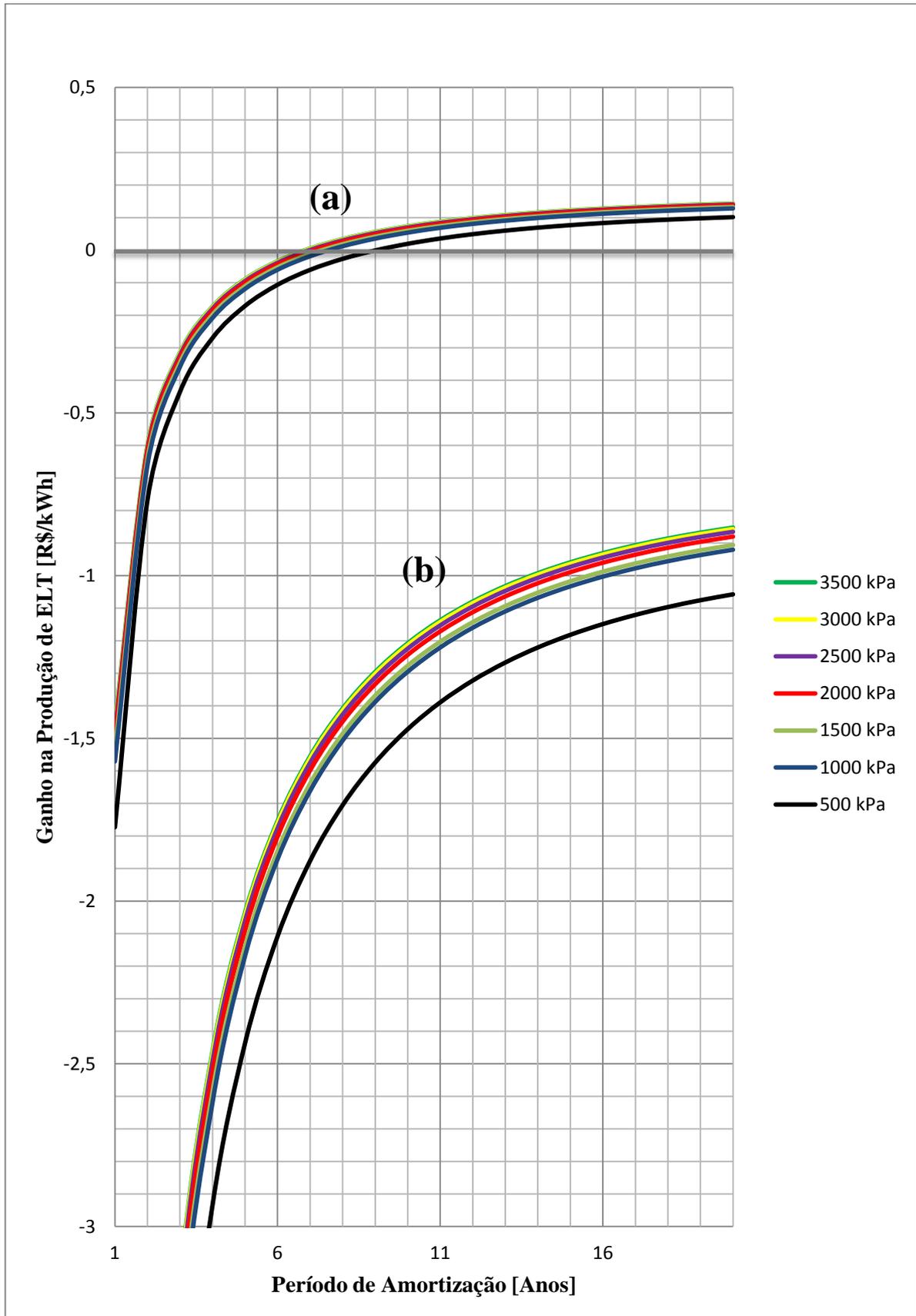


Figura 5.6 – Gráfico do *Payback* com **tolueno** como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

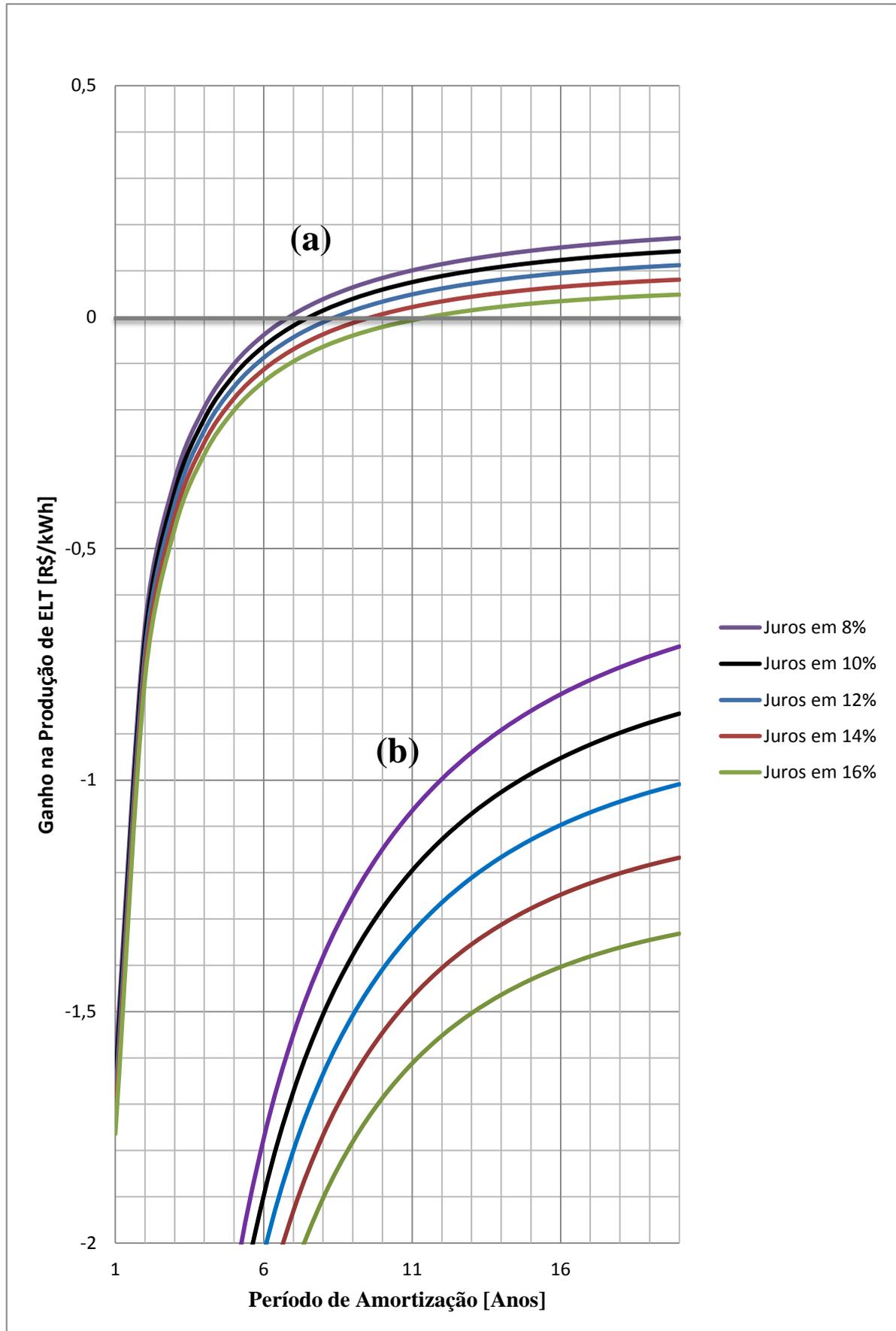


Figura 5.7 – Gráfico do *Payback* com **acetona** como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

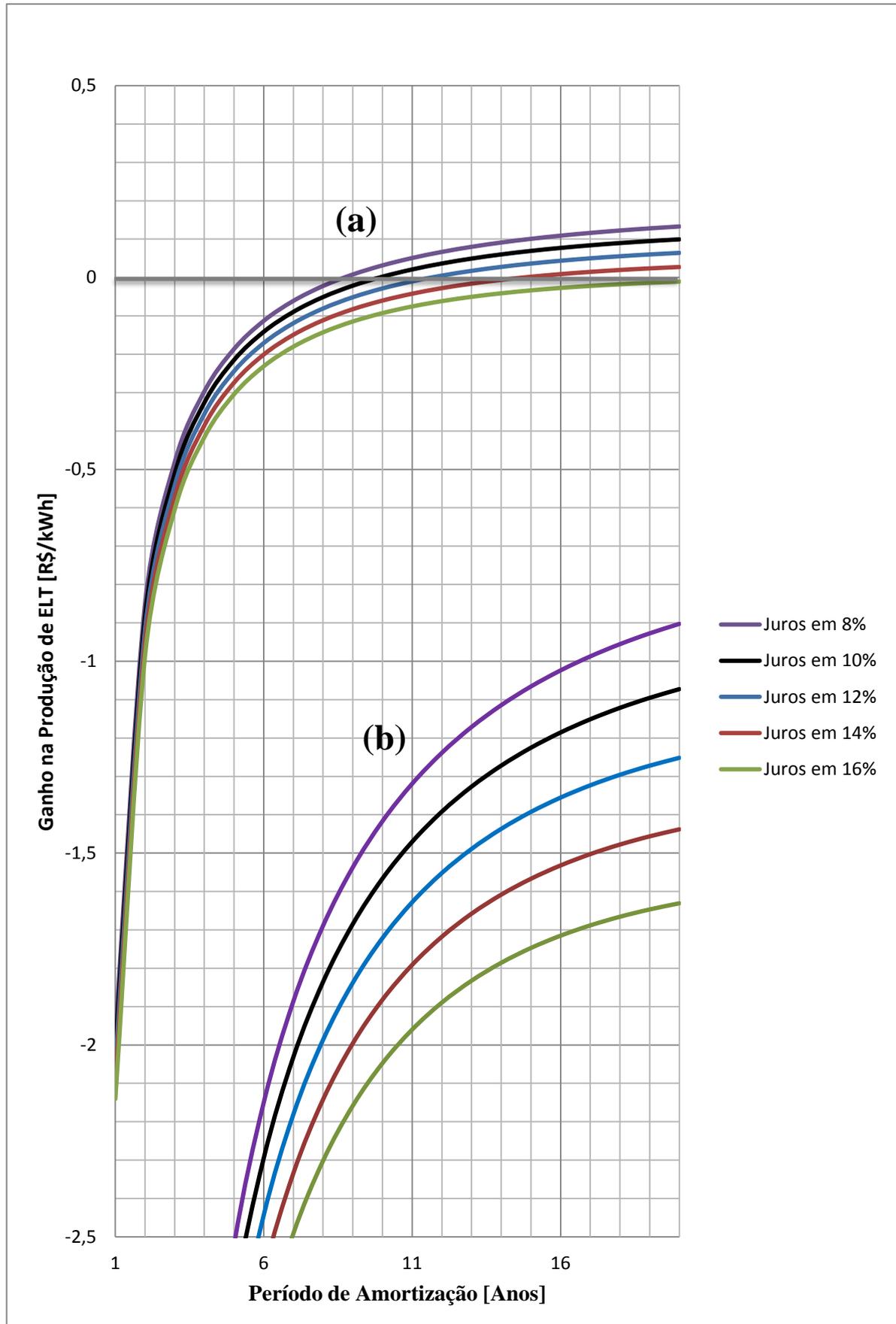


Figura 5.8 – Gráfico do *Payback* com **octano** como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

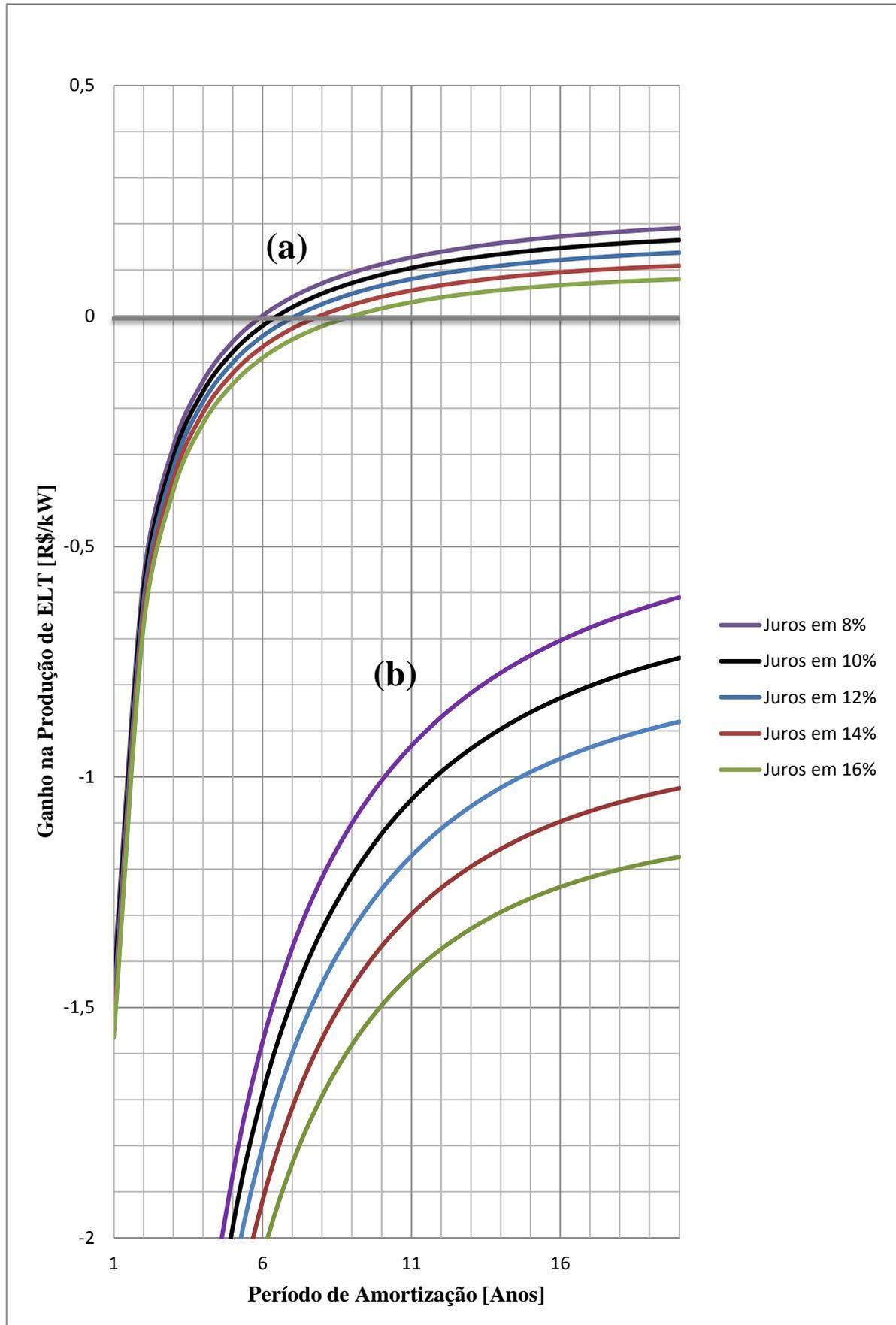


Figura 5.9 – Gráfico do *Payback* com **tolueno** como fluido de trabalho ( $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

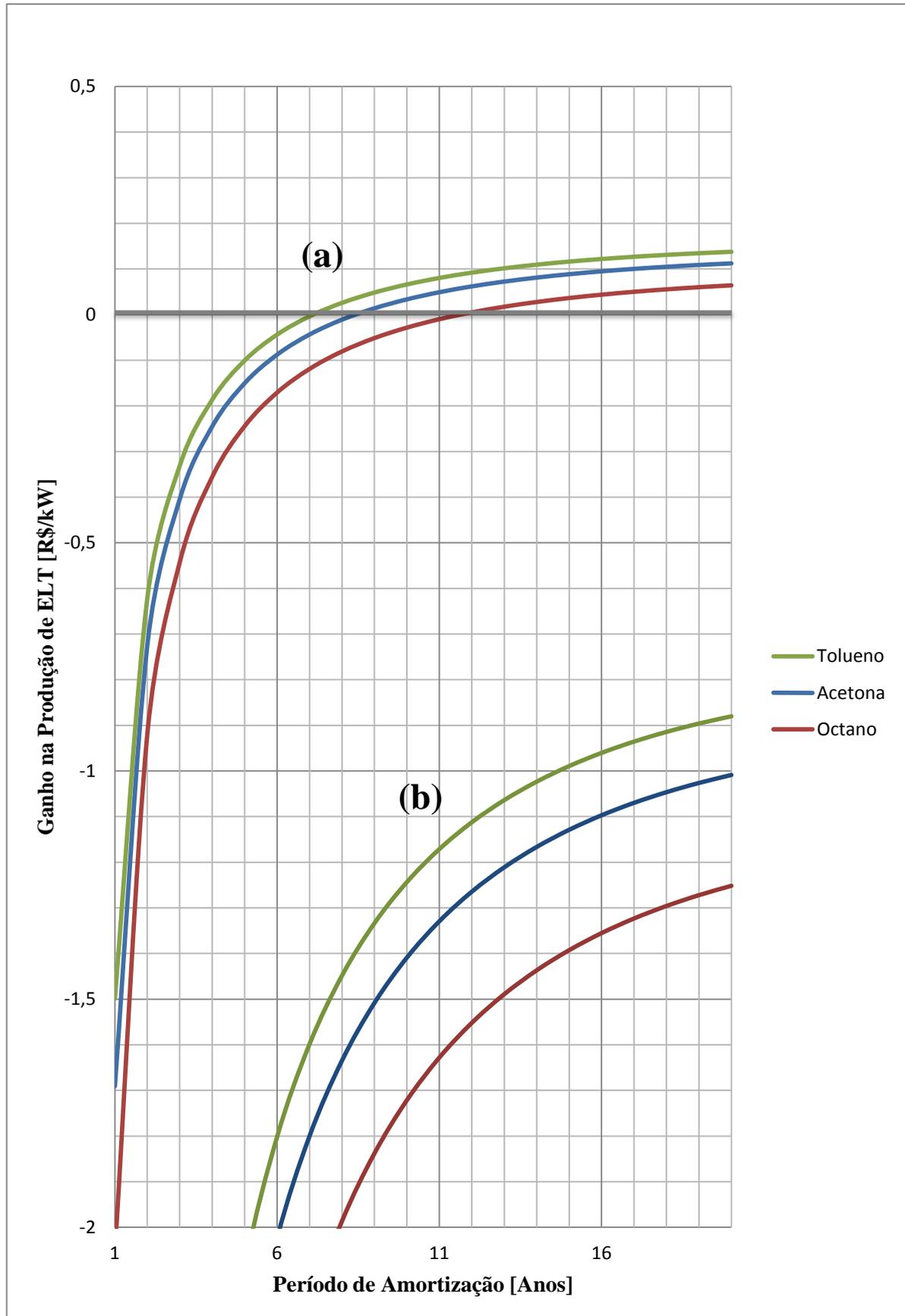


Figura 5.10 – Gráfico de comparação entre os *Payback* da acetona, do octano e do tolueno para  $P_{\text{evap}} = 2.000$  kPa e  $i = 12\%$ , (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

### 5.4.2 Configuração do sistema ORC com torre de resfriamento

Para a configuração com torre de resfriamento os resultados obtidos são análogos aos do mostrados na seção 5.5.1. A planta ORC que possui sistema de resfriamento da água de condensação é, em média, 24,5% mais cara que a outra, em termos de investimento inicial. Os valores de custo inicial para esta planta ORC estão entre R\$ 2.172.413,01 e R\$ 12.794.283,23, como mostrado na Tabela 5.7.

Para o EPC desses três fluidos (acetona, octano e tolueno) a desigualdade ainda esta a favor do sistema sem torre de resfriamento (Figuras 5.11 a 5.13), atingindo valores de diferenças de preços 25% quando as pressões de evaporação são mais elevadas e de até 40% para as pressões de evaporação são mais baixas.

A regra para o ganho na venda da eletricidade produzida é a mesma que para o EPC (Figuras 5.14 a 1.16). Então o tempo para retorno do capital investido é mais alto para o sistema que possui a torre de resfriamento, por volta de um a cinco anos, dependendo do caso comparado entre os três fluido analisados.

Para efeito de comparação, as Figuras 5.17 a 5.19 mostram o ganho na venda da energia elétrica produzida em função, hora da taxa de juros, hora das pressões de evaporação para seis casos analisados. Ainda, a Figura 5.20 expressa a diferença nos ganhos e no tempo de retorno de investimento entre esses três fluidos de trabalho (acetona, octano e tolueno), para um caso específico de mesma taxa de juros e pressão de evaporação ( $i = 12\%$  e  $P_{\text{evap}} = 2.000 \text{ kPa}$ ).

Tabela 5.7 – Custo de investimento da planta ORC analisada com torre de resfriamento.

<b>Fluidos de trabalho</b>	<b>Pressão de evaporação [kPa]</b>	<b>Potência líquida [kW]</b>	<b>Configuração mais barata [R\$]</b>	<b>Configuração mais cara [R\$]</b>
Tolueno	500	123,36	2.234.085,62	11.730.055,62
	1.000	139,62	2.271.984,42	11.910.053,21
	1.500	148,17	2.347.752,27	12.352.527,57
	2.000	153,51	2.374.500,95	12.490.447,20
	2.500	157,26	2.396.980,64	12.606.387,96
	3.000	160,03	2.416.484,49	12.707.104,21
	3.500	162,03	2.433.321,74	12.794.283,23
Acetona	500	88,65	2.172.413,01	11.402.975,92
	1.000	113,95	2.228.773,63	11.681.415,06
	1.500	127,54	2.312.306,97	12.164.369,28
	2.000	136,62	2.345.056,95	12.334.591,98
	2.500	143,32	2.371.854,89	12.473.896,65
	3.000	148,43	2.394.511,55	12.591.789,01
	3.300	151,11	2.406.810,96	12.655.893,71
Octano	500	93,89	2.183.182,52	11.458.130,60
	1.000	104,65	2.213.660,34	11.598.997,56
	1.500	110,01	2.283.888,41	12.011.343,83
	2.000	113,08	2.306.698,89	12.128.634,74
	2.200	113,82	2.314.232,83	12.167.436,03

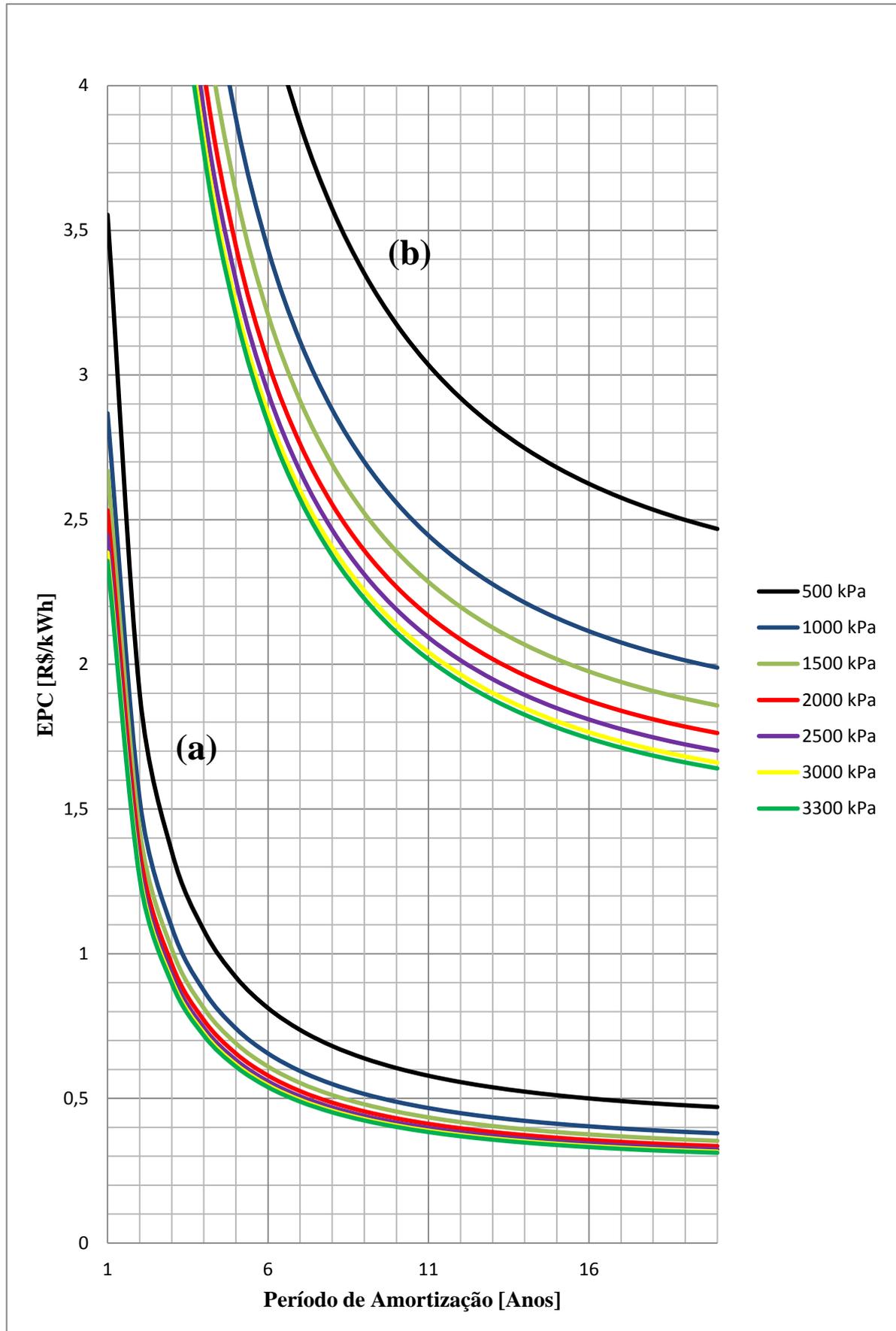


Figura 5.11 – Gráfico do EPC com acetona como fluido de trabalho (i = 12%), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

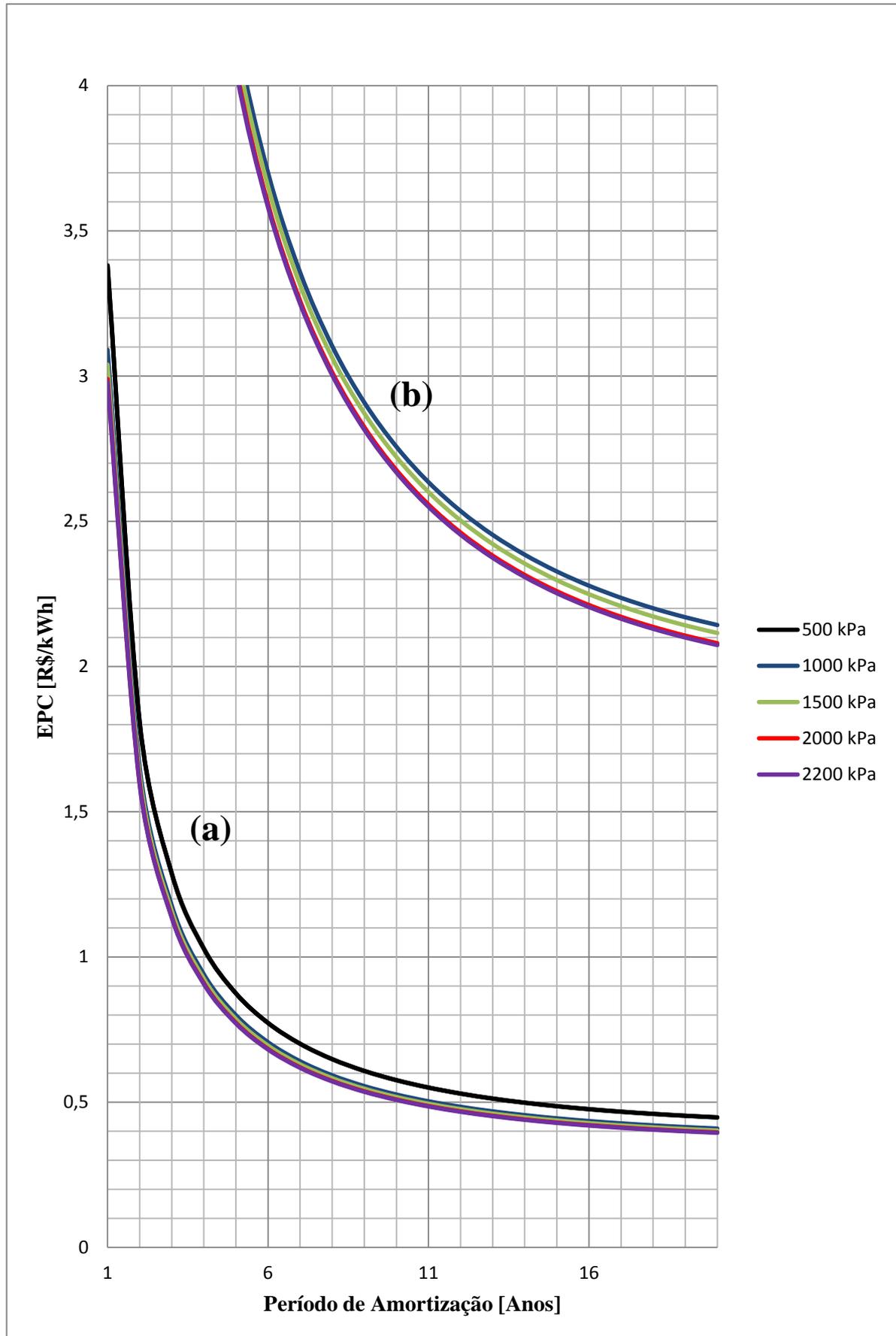


Figura 5.12 – Gráfico do EPC com octano como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

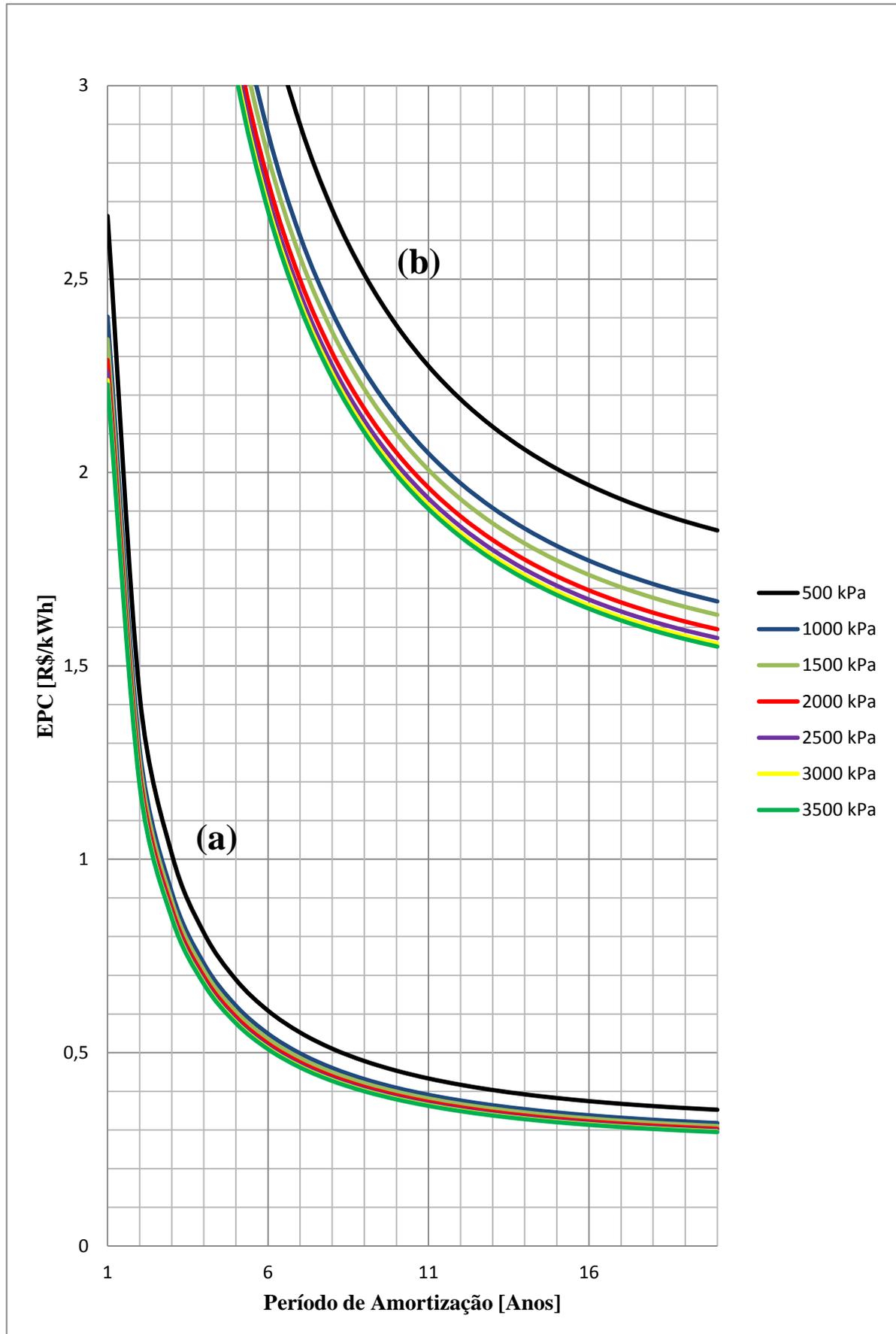


Figura 5.13 – Gráfico do EPC com tolueno como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

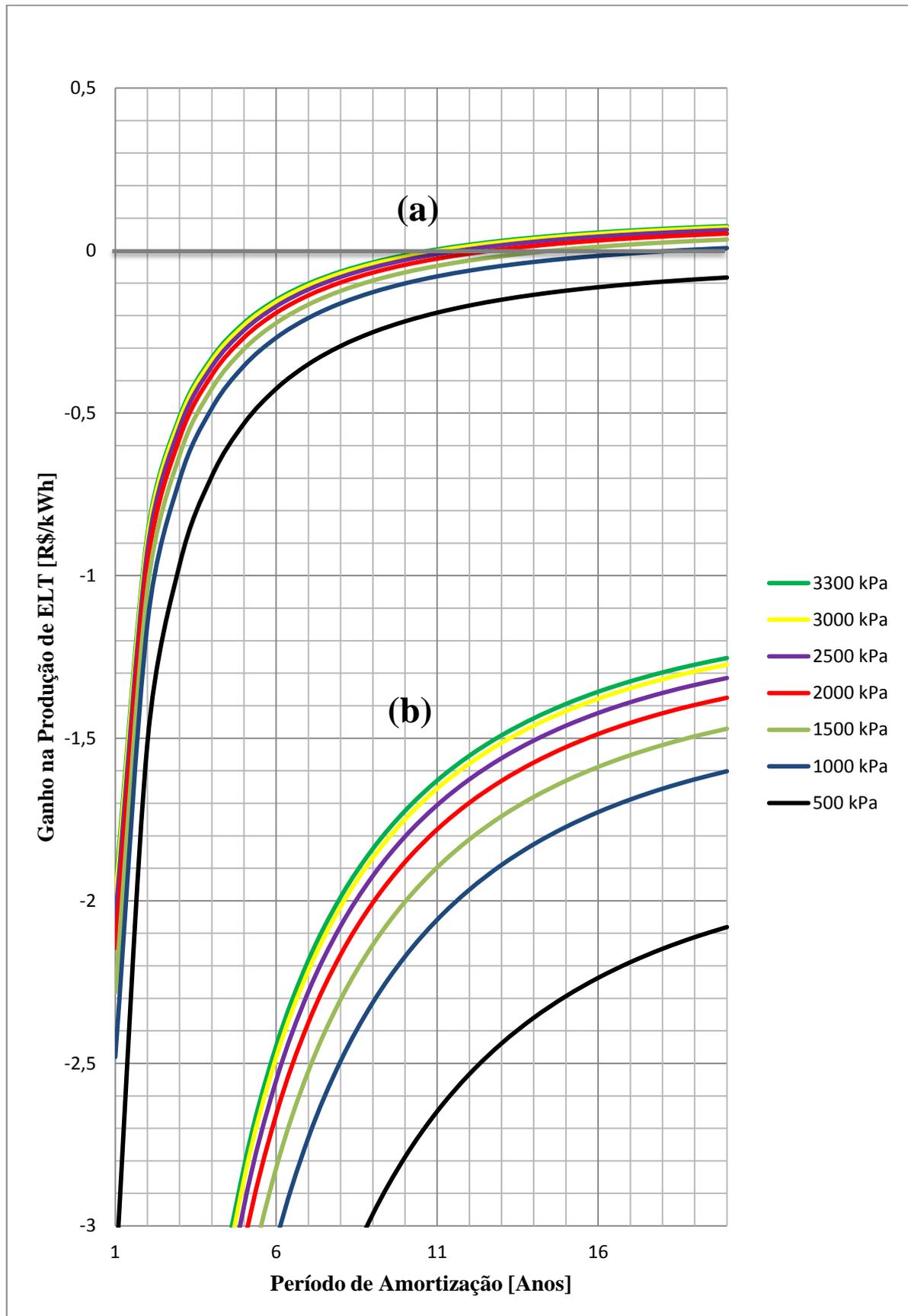


Figura 5.14 – Gráfico do *Payback* com acetona como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

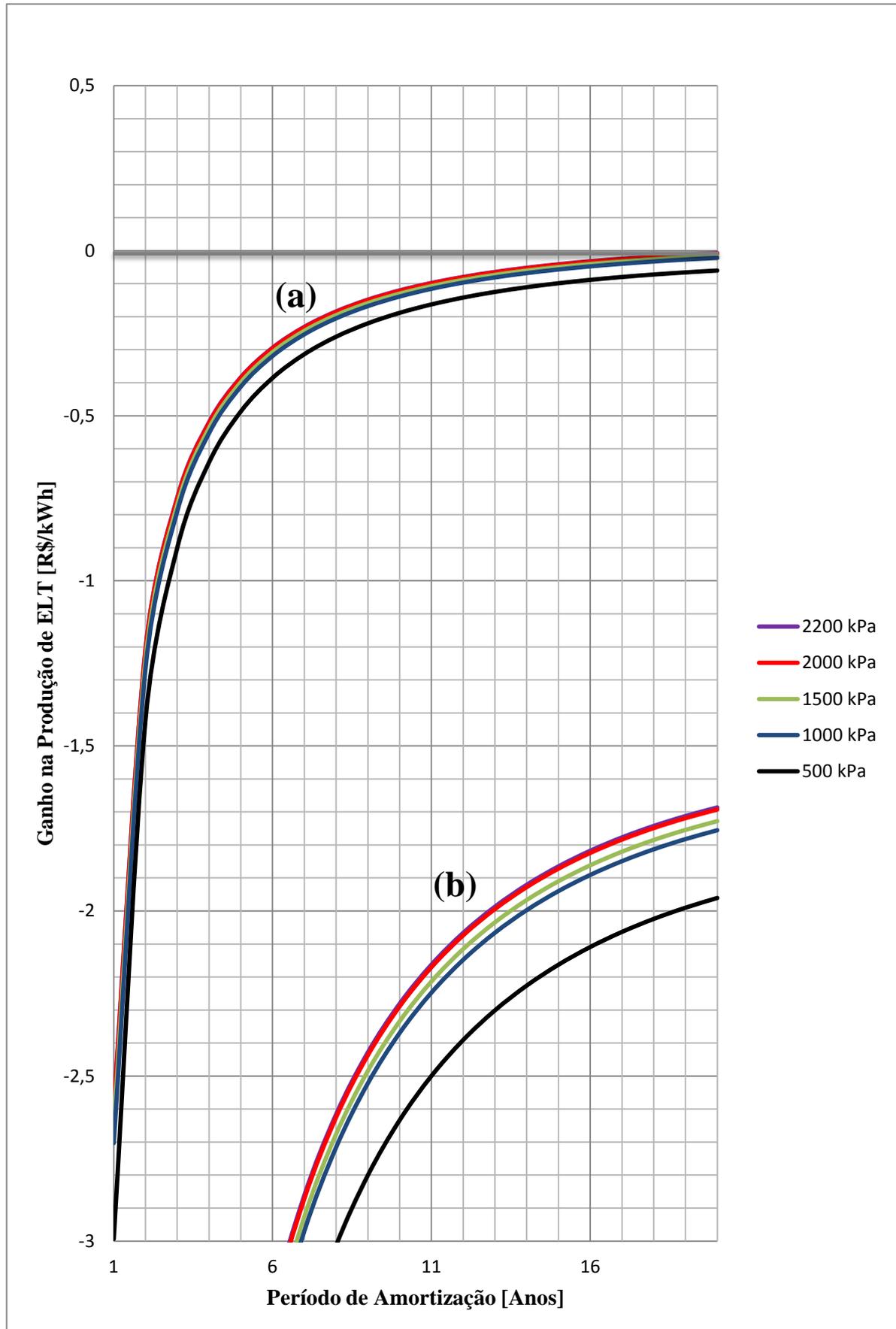


Figura 5.15 – Gráfico do *Payback* com *octano* como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

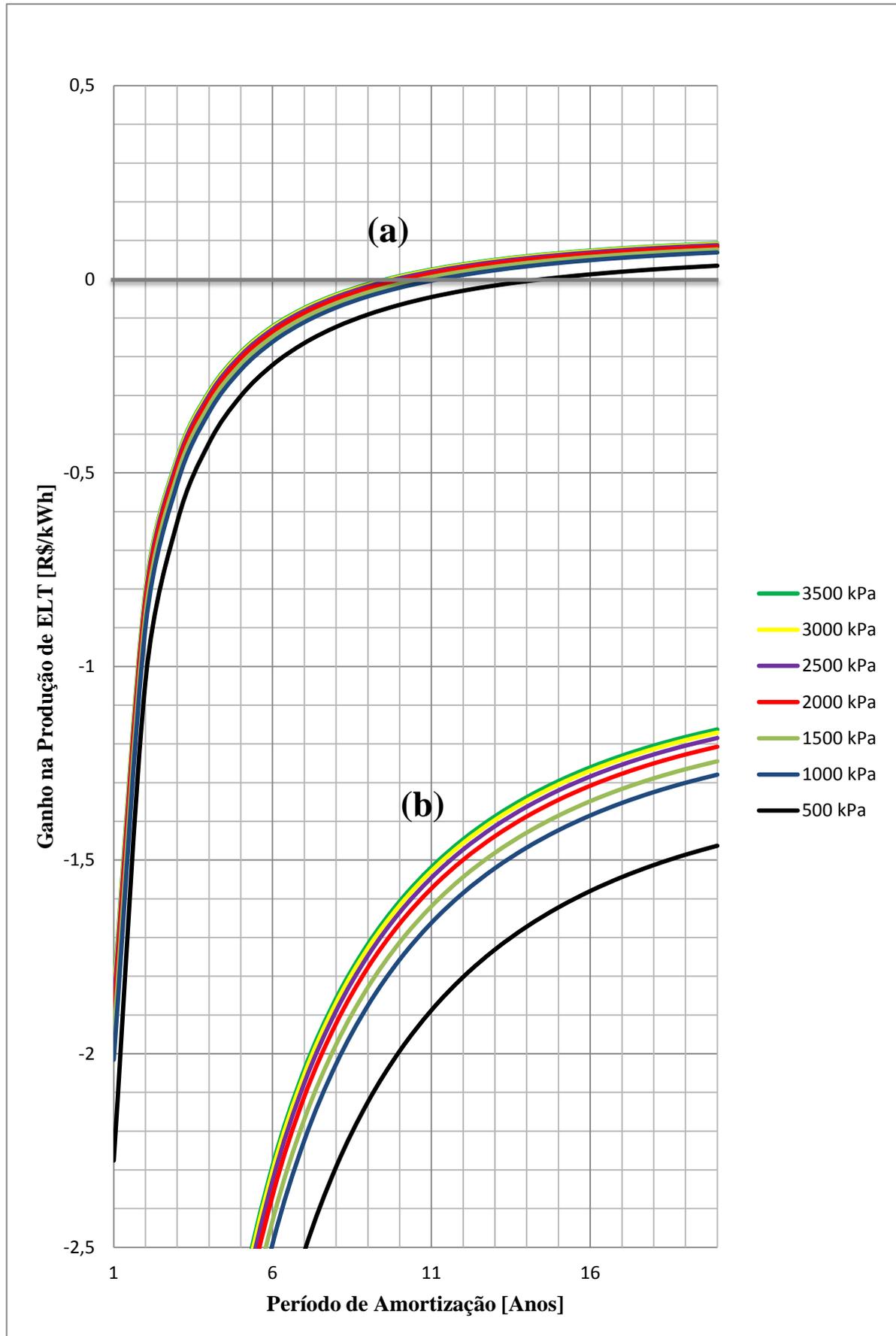


Figura 5.16 – Gráfico do *Payback* com **tolueno** como fluido de trabalho ( $i = 12\%$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

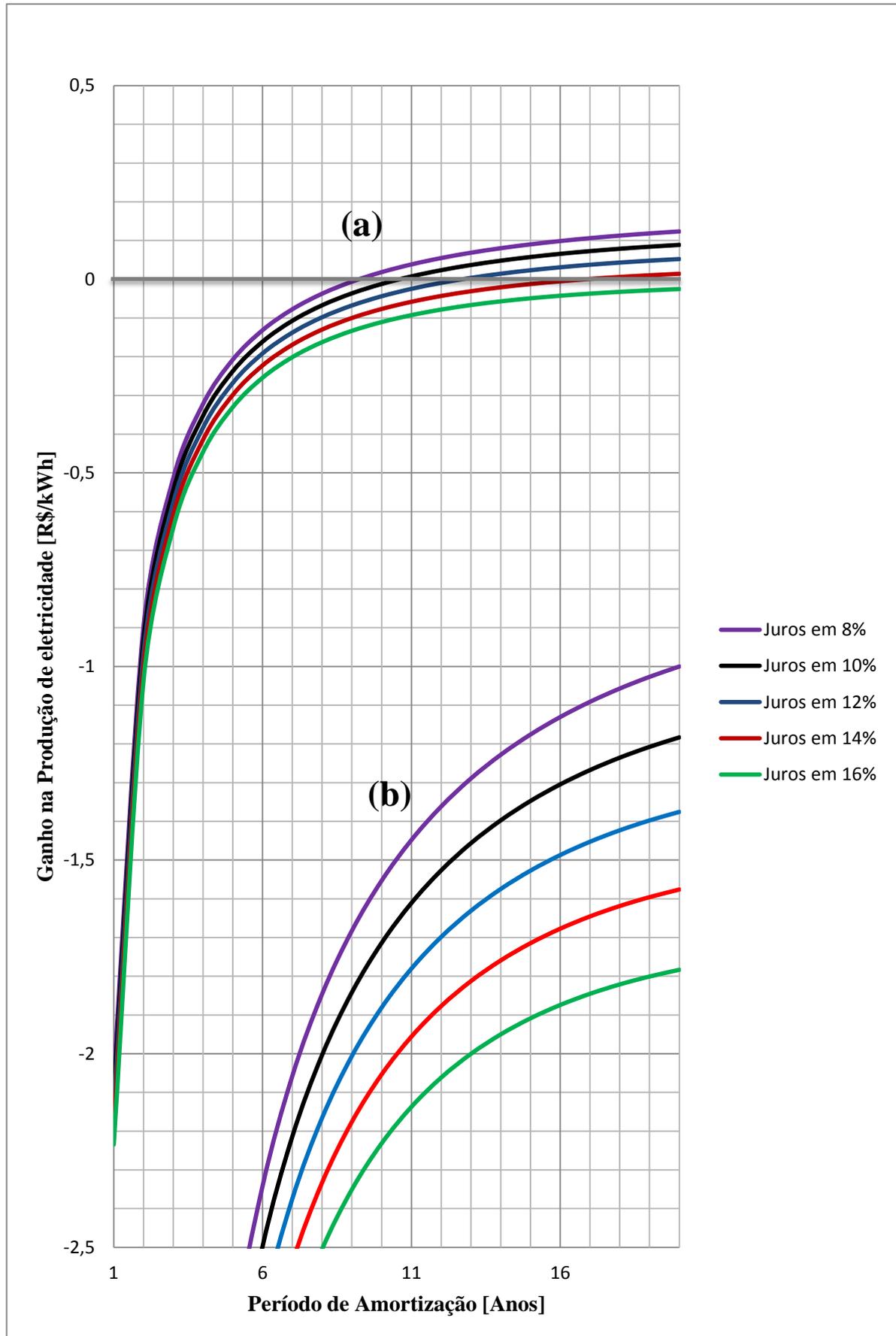


Figura 5.17 – Gráfico do *Payback* com acetona como fluido de trabalho ( $P_{evap} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

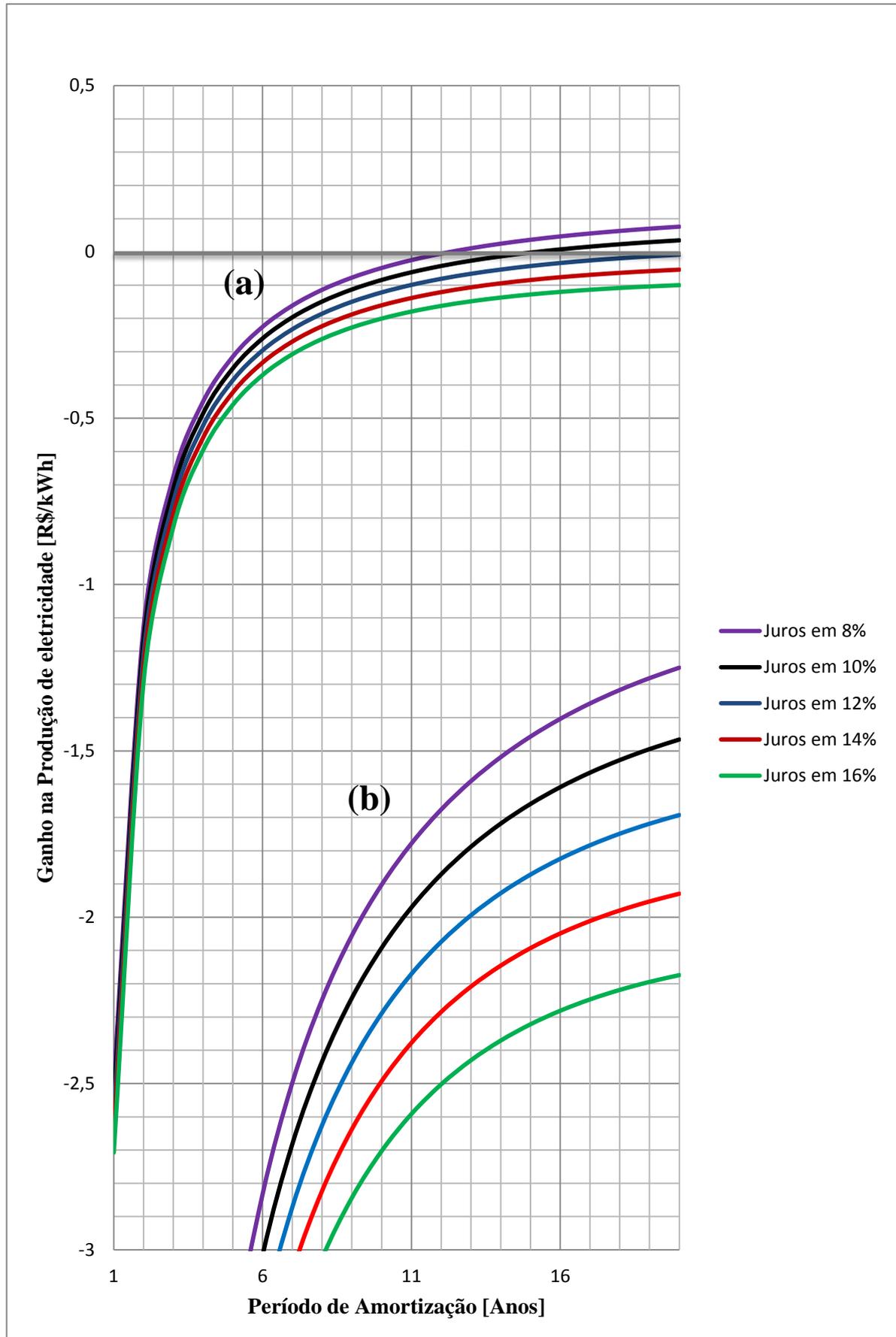


Figura 5.18 – Gráfico do *Payback* com *octano* como fluido de trabalho ( $P_{evap} = 2.000$  kPa), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

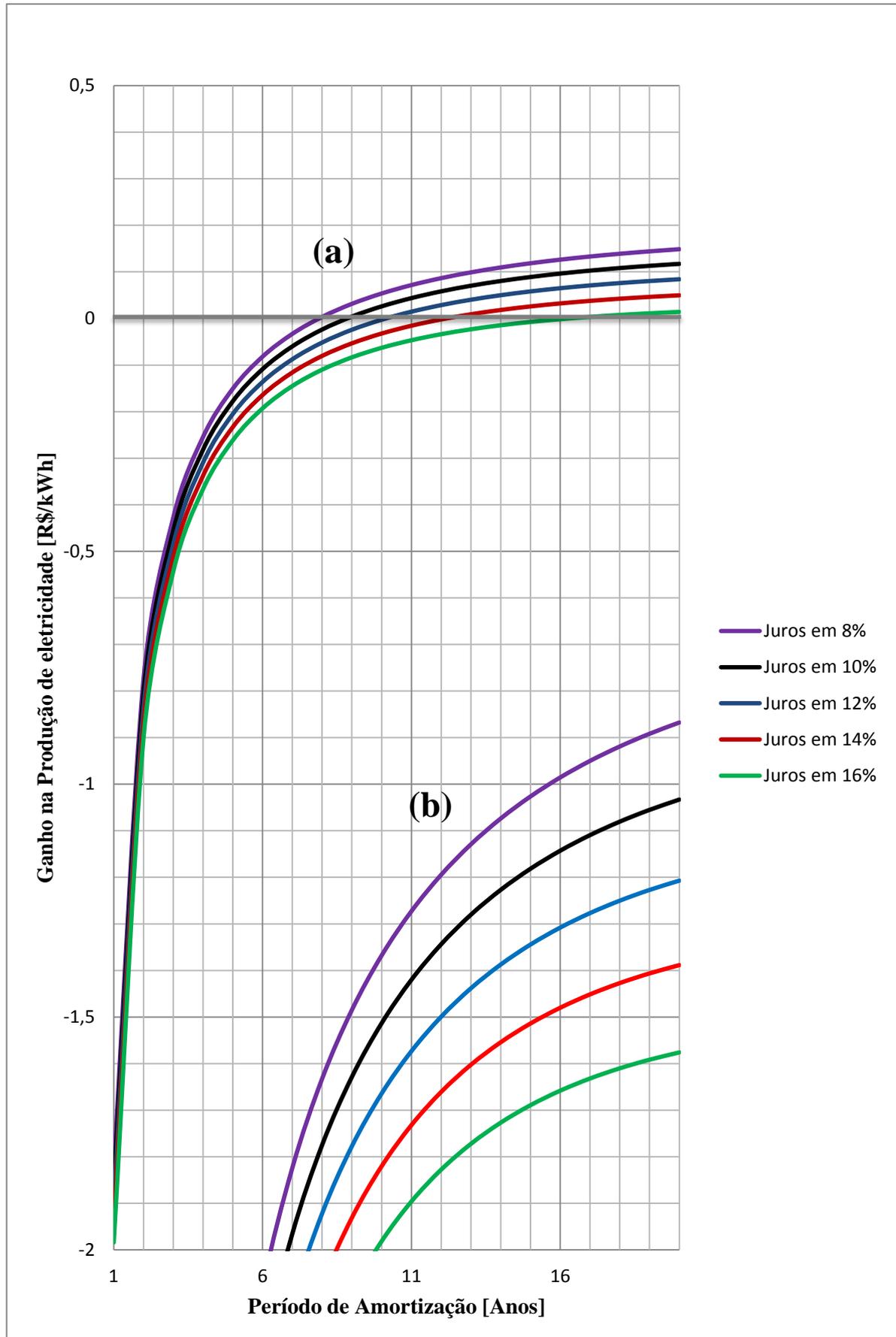


Figura 5.19 – Gráfico do *Payback* com **tolueno** como fluido de trabalho ( $P_{evap} = 2.000 \text{ kPa}$ ), (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

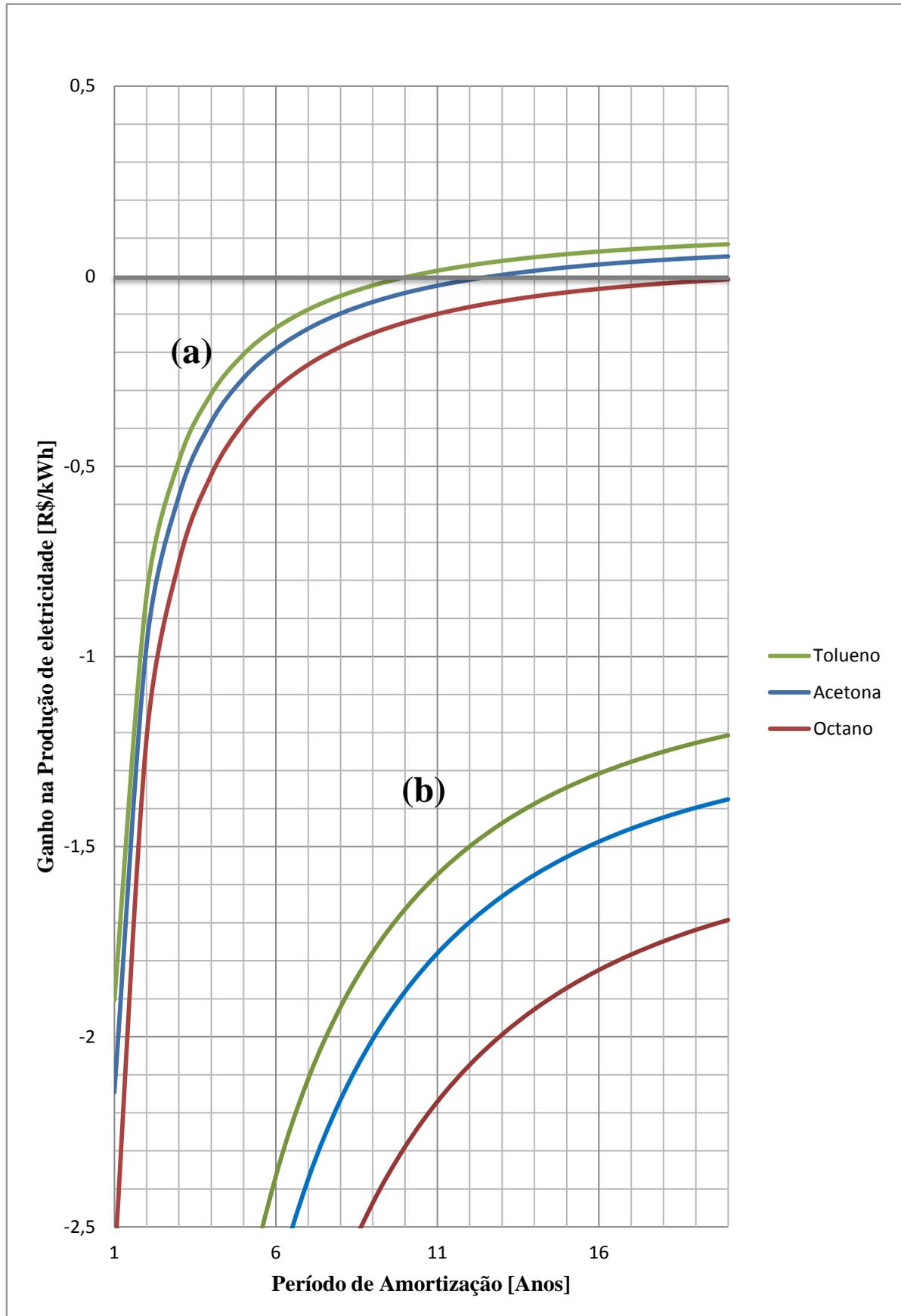


Figura 5.20 – Gráfico de comparação entre os *Payback* da acetona, do octano e do tolueno para  $P_{evap} = 2.000$  kPa e  $i = 12\%$ , (a) planta ORC com configuração de menor custo e (b) planta ORC com configuração de maior custo.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi utilizado um motor estacionário da CATERPILLAR para fornecer os dados do gás de exaustão (temperatura, pressão, vazão e composição) a ser simulado, no *software* HYSYS v.8.6, como fonte de calor para duas configurações de ORC's propostos. Primeiramente, dados técnicos foram colhidos para ambas às plantas. Tais dados foram iguais no que se diz respeito à energia produzida, porém, como a configuração que possui sistema de resfriamento para a água de condensação (ORC 2) possui uma bomba a mais, este produziu uma quantidade de energia útil (ou energia líquida) ligeiramente menor. Como exemplo, para o tolueno como fluido de trabalho, a uma pressão de evaporação de 3.000 kPa, para o ORC sem sistema de resfriamento da água de condensação (ORC 1) a energia líquida produzida foi de 163,55 kW, enquanto para o ORC 2 foi de 162,03 kW.

Para os outros quesitos avaliados na análise técnica, perdas por irreversibilidades, eficiências de Primeira e Segunda Lei e vazão da água de condensação, a regra manteve-se constante. A configuração ORC 1 teve desempenho um pouco maior em todos esses quesitos, exceto nas perdas por irreversibilidades do sistema ORC, uma vez que as temperaturas e pressões não são alteradas em qualquer ponto do ciclo. Os valores para a eficiência de Primeira Lei do ciclo são baixos devido as grandes perdas por irreversibilidade que ocorrem no sistema. Mesmo assim a energia líquida produzida ultrapassa, em alguns casos, 19% da energia produzida pelo MCI.

O modelo econômico baseado no CEPCI é bastante útil para análises estratégicas para investimentos de uma empresa. Tal método produz dados de acordo com a realidade do mercado e é uma ótima ferramenta para avaliação da viabilidade econômica para instalação de plantas químicas, como a do ORC. Nesta dissertação foram feitas simulações para alguns fluidos de trabalho que apresentaram desempenho satisfatório na análise técnica, tem boa disponibilidade no mercado (acetona, tolueno e octano). Três parâmetros foram avaliados em tais simulações: custo de investimento, custo da eletricidade produzida e *payback*. Nos dois últimos quesitos, independente da configuração do ORC, quanto maior era a pressão de evaporação do sistema, menores eram os resultados da análise. Já para o custo de investimento da planta (ORC 1 ou ORC 2) quanto maior a pressão de evaporação, maior era o custo da planta, pois como se produz mais potência é necessário equipamentos de maior tecnologia e, conseqüentemente, mais caros. Ainda, para as mesmas condições, o tolueno se mostrou mais eficiente e o octano o menos entre os três fluidos.

De maneira geral, não apenas os três fluidos em questão, os sistemas ORC montados com os equipamentos mais caros, em todos os quesitos analisados, retornaram resultados que inviabilizam sua implantação. Os custos de investimento na planta estavam entre 8,7 e 10,3 milhões de reais para a configuração ORC 1 e entre 11,4 e 12,8 milhões para a ORC 2. Com isso os valores de EPC também eram muito elevados e faziam com que o retorno financeiro viesse depois de 20 anos da planta em operação. Logo, deve ser feita a opção por equipamentos sempre mais econômicos possível, dentro das especificações de resistência e segurança do projeto do sistema.

Como exemplo, a análise econômica realizada neste trabalho, mostrou que para a configuração ORC 1, montada com equipamentos de menor custo possível, o retorno financeiro pode chegar em seis anos, aproximadamente, de operação, no caso específico do tolueno como fluido de trabalho,  $P_{\text{evap}} = 3.500 \text{ kPa}$  e 12% de taxa anual de juros. Tal planta tem como investimento inicial um custo de R\$ 2.014.690,08, assim é percebido que a implantação de um sistema ORC pode não ser vantajosa apenas pelo comércio da energia elétrica, uma vez que o retorno financeiro tardaria em ser atingido. Todavia os avanços tecnológicos com um sistema que diminui as emissões de poluentes, bem como aumenta consideravelmente a eficiência do motor que produz a energia elétrica, pode trazer para a empresa ganhos com publicidade e em aumento de investidores interessados nesse tipo de tecnologia. Vale lembrar que essa planta pode ser instalada em qualquer região, uma vez que a proximidade de uma fonte constante de água não é primordial (ORC 2) como mostram os resultados, R\$ 2.433.321,74 de investimento inicial e *payback* em sete anos e dois meses, aproximadamente, de operação da planta com sistema de resfriamento da água de condensação ( $i = 8\%$ , tolueno e  $P_{\text{evap}} = 3.500 \text{ kPa}$ ).

Finalmente, para efeito de comparação de custo, a fabricante TRIOGEN (Triogen, 2016) construiu uma planta ORC na Holanda que recupera calor, dos gases de exaustão de um MCI que funciona com biodiesel, a mais de  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  e com isso é capaz de produzir 160 kW de potência, utilizando tolueno como fluido de trabalho, com um custo de investimento de, aproximadamente, 12.900 R\$/kW (Da Silva, 2010 e Vélez, 2012a); já na presente dissertação, utilizando também o tolueno como fluido de trabalho e pressão de evaporação de 2.500 kPa, por exemplo, no sistema ORC sem torre de resfriamento, é possível produzir praticamente a mesma quantidade de energia que a planta da TRIOGEN com um custo de investimento, como mostrado na Tabela 5.6, de R\$1.977.956,89 o que representa um valor de 12.362,23 R\$/kW. Portanto, pode-se concluir que os cálculos apresentados nas simulações desta dissertação estão condizentes com valores reais de mercado.

## **Sugestões para trabalhos futuros**

Propõe-se otimizar o sistema ORC, tanto com a torre de resfriamento quanto o outro, por exemplo, em termos da vazão de fluido de trabalho e tamanho dos trocadores de calor utilizando um algoritmo genético. Também, comparar os resultados econômicos com custos reais de cada equipamento por meio de dados de fabricantes ou utilizando outros modelos econômicos, como o modelo baseado nas irreversibilidades do sistema (análise exergoeconômica). Ainda, se possível, implantar o projeto em parceria com alguma termelétrica disposta a aumentar a eficiência de seu sistema de geração de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGIERI. A., MORRONE. P. **Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector.** Applied Thermal Engineering, v.71, p.751-759, 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia elétrica. [http://relatorios.aneel.gov.br/\\_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1](http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1). Acessado as 11h20m de 21/11/2015.

ANEKE. M., AGNEW. B., UNDERWOOD. C. **Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant.** Applied Thermal Engineering, v.31, p.1825-1832, 2011.

APOSTOL V., POP H., DOBROVICESCU A., PRISECARU T., ALEXANDRU A., PRISECARU M. **Thermodynamic Analysis of ORC Configurations Used For WHR from a Turbocharged diesel engine.** Procedia Engineering, v.100, p.549-558, 2015.

ASPEN<sup>®</sup> HYSYS versão 8.6.

BAO J., ZHAO L. **A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.24, p.325-342, 2013.

BRANCHINI. L., PASCALE. A., PERETTO. A. **Systematic comparison of ORC configurations by means of comprehensive performance indexes.** Applied Thermal Engineering, v.61, p.129-140, 2013.

CARCASCI. C., FERRARO. R., MILIOTTI. E. **Thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from gas turbines.** Energy, v.65, p.91-100, 2014.

CATERPILLAR<sup>®</sup>. **Diesel Grupo Gerador.** EUA, 26/03/2008.

CAYER E., GALANIS N., NESREDDINE H. **Parametric study and optimization of a transcritical power cycle using a low temperature source.** Applied Energy, v.87, p.1349-1357, 2010.

Chemical Engineering. [www.chemengonline.com](http://www.chemengonline.com). Acessado em Janeiro 2015.

CHEW J. M., REDDY C.C.S., RANGAIAH G.P. **Improving energy efficiency of dividing-wall columns using heatpumps, Organic Rankine Cycle and Kalina Cycle.** Chemical Engineering and Processing, v.76, p.45-59, 2014.

DA SILVA, J., **Projeto de um Ciclo de Rankine Orgânico para a produção de 1MW de eletricidade.** M. Sc. Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010;

FERRARA. F., GIMELLI. A., LUONGO. A. **Small-scale concentrated solar power (CSP) plant: ORCs comparison for different organic fluids.** Energy Procedia, v.45, p.217-226, 2014.

FIASCHI. D., LIFSHITZ. A., MANFRIDA. G., TEMPESTI. D. **An innovative ORC power plant layout for heat and power generation from medium- to low-temperature geothermal resources.** Energy Conversion and Management, v.88, p.883-893, 2014.

GOMES. R. P. F., HENRIQUES. J. C. C., GATO. L. M. C., FALCÃO. A. F. O. **Multi-point aerodynamic optimization of the rotor blade sections of an axial-flow impulse air turbine for wave energy conversion.** Energy, v.45, p.570-580, 2012.

GUZOVIĆ. Z., RAŠKOVIĆ. P., BLATARIĆ. Z. **The comparison of a basic and a dual-pressure ORC (Organic Rankine Cycle): Geothermal Power Plant Velika Ciglena case study.** Energy, v.76, p.175-186, 2014.

HETTIARACHCHI. H. D. M., GOLUBOVIC. M., WOREK. W. M., IKEGAMI. Y. **Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources.** Energy, v.32, p.1698-1706, 2007.

LE V. L., KHEIRI A., FEIDT M., PELLOUX-PRAYER S. **Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid.** Energy, v.78, p.622-638, 2014.

LIU. H., SHAO. Y., LI. J. **A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) e Thermodynamic modelling studies.** Biomass and Bioenergy, v.35, p.3985-3994, 2011.

LONG. R., BAO. Y. J., HUANG. X. M., LIU. W. **Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery**. Energy, v.30, p.1-9, 2014.

LU. Y., HE. W., WU. Y., JI. W., MA. C, GUO. H. **Performance study on compressed air refrigeration system based on single screw expander**. Energy, v.55, p.762-768, 2013.

MEINEL. D., WIELAND. C., SPLIETHOFF. H. **Economic comparison of ORC (Organic Rankine cycle) processes at different scales**. Energy, v.74, p.694-706, 2014.

MEINEL. D., WIELAND. C., SPLIETHOFF. H. **Effect and comparison of different working fluids on a two-stage organic rankine cycle (ORC) concept**. Applied Thermal Engineering, v.63, p.246-253, 2014.

MIGNARD D. **Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators**. Chemical Engineering Research and Design, v.92, p.285-294, 2014.

PEREIRAS. B., F., MARJANI. A., RODRÍGUEZ. M. A. **An improved radial impulse turbine for OWC**. Renewable Energy, v.36, p.1477-1484, 2011.

PERIS. B., NAVARRO-ESBRÍ. J., MOLÉS. F. **Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery**. Applied Thermal Engineering, v.61, p.364-371, 2013.

PETROBRAS. **Óleo diesel rodoviário S-500 tipo B [A] NP-2**. Acesso as 16h16m de 06/11/2014.

QIU. G., SHAO. Y., LI. J., LIU. H., RIFFAT. S. B. **Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications**. Fuel, v.96, p.374-382, 2012.

QUOILIN. S., BROEK. M. V. D., DECLAYE. S., DEWALLEF. P., LEMORT. V. **Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.22 p.168-186, 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.

RENTIZELAS. A., KARELLAS. S., KAKARAS. E., TATSIPOULOS. I. **Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications.** Energy Conversion and Management, v.50, p.674-681, 2009.

RODRÍGUEZ. C. E. C., PALACIO. J. C. E., VENTURINI. O. J., LORA. E. E. S., COBAS. V. M., SANTOS. D. M., DOTTO. F. R. L., GIALLUCA. V. **Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil.** Applied Thermal Engineering, v.52, p.109-119, 2013.

ROY. J. P., MISHRA. M. K., MISRA. A. **Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle.** Energy, p.1-14, 2010.

SAIDUR. R., REZAEI. M., MUZAMMIL. M. K., HASSAN. M. H., PARIA. S., HASANUZZAMAN. M. **Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.16, p.5649-5659, 2012.

SHU G., YU G., TIAN H., WEI H., LIANG X. **A Multi-Approach Evaluation System (MA-ES) of Organic Rankine Cycles (ORC) used in waste heat utilization.** Applied Energy, v.132, p.325-338, 2014.

SHU. G., GAO. Y., TIAN. H., WEI. H., LIANG. X. **Study of mixtures based on hydrocarbons used in ORC (Organic Rankine Cycle) for engine waste heat recovery.** Energy, v.74, p.428-438, 2014.

SITTLER L., AJIKUTIRA D. **Jump start: Aspen HYSYS® V8.** A guide for getting started in Aspen HYSYS.

SONG. J., LI. Y., GU. C., ZHANG. L. **Thermodynamic analysis and performance optimization of an ORC (Organic Rankine Cycle) system for multi-strand waste heat sources in petroleum refining industry.** Energy, v.71, p.673-680, 2014;

SOTO. R., VERGARA. J. **Thermal power plant efficiency enhancement with Ocean Thermal Energy Conversion.** Applied Thermal Engineering, v.62, p.105-112, 2014.

SPROUSE III. C., DEPCIK. C. **Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery.** Applied Thermal Engineering, v.51, p.711-722, 2013.

SUN. F., IKEGAMI. Y., JIA. B., ARIMA. H. **Optimization design and exergy analysis of organic rankine cycle in ocean thermal energy conversion.** Applied Ocean Research, v.35, p.38-46, 2012.

TCHANCHE. B. F., LAMBRINOS. G., FRANGOUDAKIS. A., PAPADAKIS. G. **Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, p.3963-3979, 2011.

TIAN H., SHU G., WEI H., LIANG X., LIU L. **Fluids and parameters optimization for the organic Rankine cycles (ORCs) used in exhaust heat recovery of Internal Combustion Engine (ICE).** Energy, v.47, p.125-136, 2012.

TOFFOLO A., LAZZARETTO A., MANENTE G., MARCO PACI M. **A multi-criteria approach for the optimal selection of working fluid and design parameters in Organic Rankine Cycle systems.** Applied Energy, v.121, p.219-232, 2014.

TRIOGEN – <http://www.triogen.nl/references/reference-overview>. Acessado as 15h de 24/02/2016.

TURTON R., BAILIE R. C., WHITING W. B., SHAEIMITZ J. A. **Synthesis and Design of Chemical Processes.** 3ª Edição, 2008.

URIS. M., LINARES. J. I., ARENAS. E. **Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle.** Renewable Energy, v.66, p.707-713, 2014.

VATAVUK W. M. **Review of Chemical Engineering Plant Cost Indexe – CEPCI.** 2002.

VÉLEZ. F., SEGOVIA. J. J., MARTÍN. M. C., ANTOLÍN. G., CHEJNE. F., QUIJANO. A. **A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.16, p.4175-4189, 2012.

VÉLEZ. F., SEGOVIA. J. J., MARTÍN. M. C., ANTOLÍN. G., CHEJNE. F., QUIJANO. A. **Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature.** Fuel Processing Technology, v.103, p.71-77, 2012.

VILELA. A. O., LORA. E. E. S., QUINTERO. Q. R., VICINTIN. R. A., SOUZA. T. P. S. **A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration.** Biomass and Bioenergy, v.69, p.222-240, 2014.

VILLARINI. M., BOCCI. E., MONETI. M., DI CARLO. A., MICANGELI. A. **State of art of small scale solar powered ORC systems: a review of the different typologies and technology perspectives.** Energy Procedia, v.45, p.257-267, 2014.

WANG. E. H., ZHANG. H. G., FAN. B. Y., OUYANG. M. G., ZHAO. Y., UM. Q. H. **Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery.** Energy, v.36, p.3406-3418, 2011.

WANG. E. H., ZHANG. H. G., ZHAO. Y., FAN. B. Y., WU. Y. T., UM. Q. H. **Performance analysis of a novel system combining a dual loop organic Rankine cycle (ORC) with a gasoline engine.** Energy, v.43, p.385-395, 2012.

WEI. D., LU. X., LU. Z., GU. J. **Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery.** Energy Conversion and Management, v.48, p.1113-1119, 2007.

YANG F., ZHANG H., BEI C., SONG S., WANG E. **Parametric optimization and performance analysis of ORC (organic Rankine cycle) for diesel engine waste heat recovery with a fin-and-tube evaporator.** Energy, v.91, p.128-141, 2015.

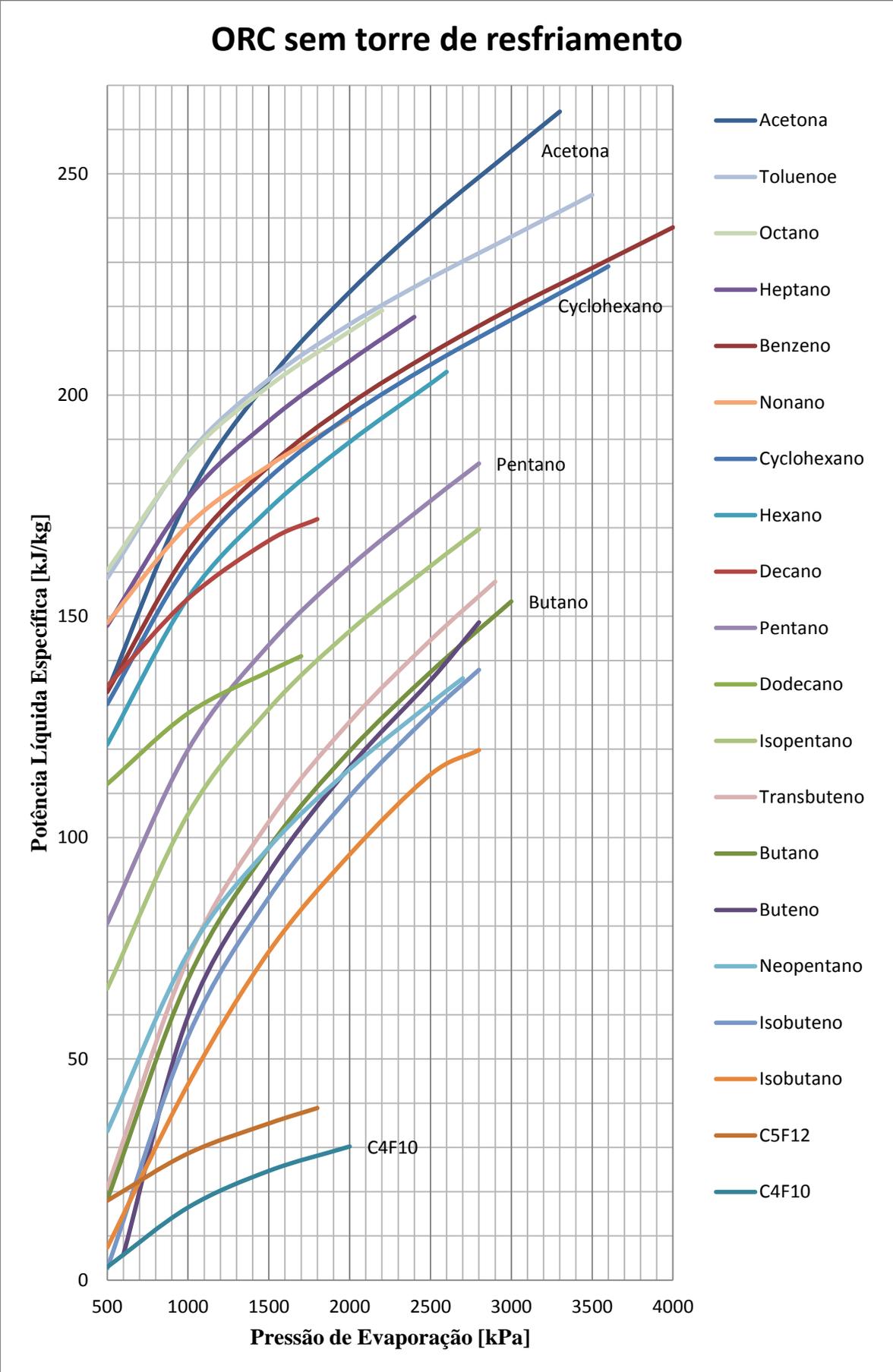
YANG. F., DONG. X., ZHANG. H., WANG. Z., YANG. K., ZHANG. J., WANG. E., LIU. H., ZHAO. G. **Performance analysis of waste heat recovery with a dual loop organic Rankine cycle (ORC) system for diesel engine under various operating conditions.** Energy Conversion and Management, v.80, p.243-255, 2014.

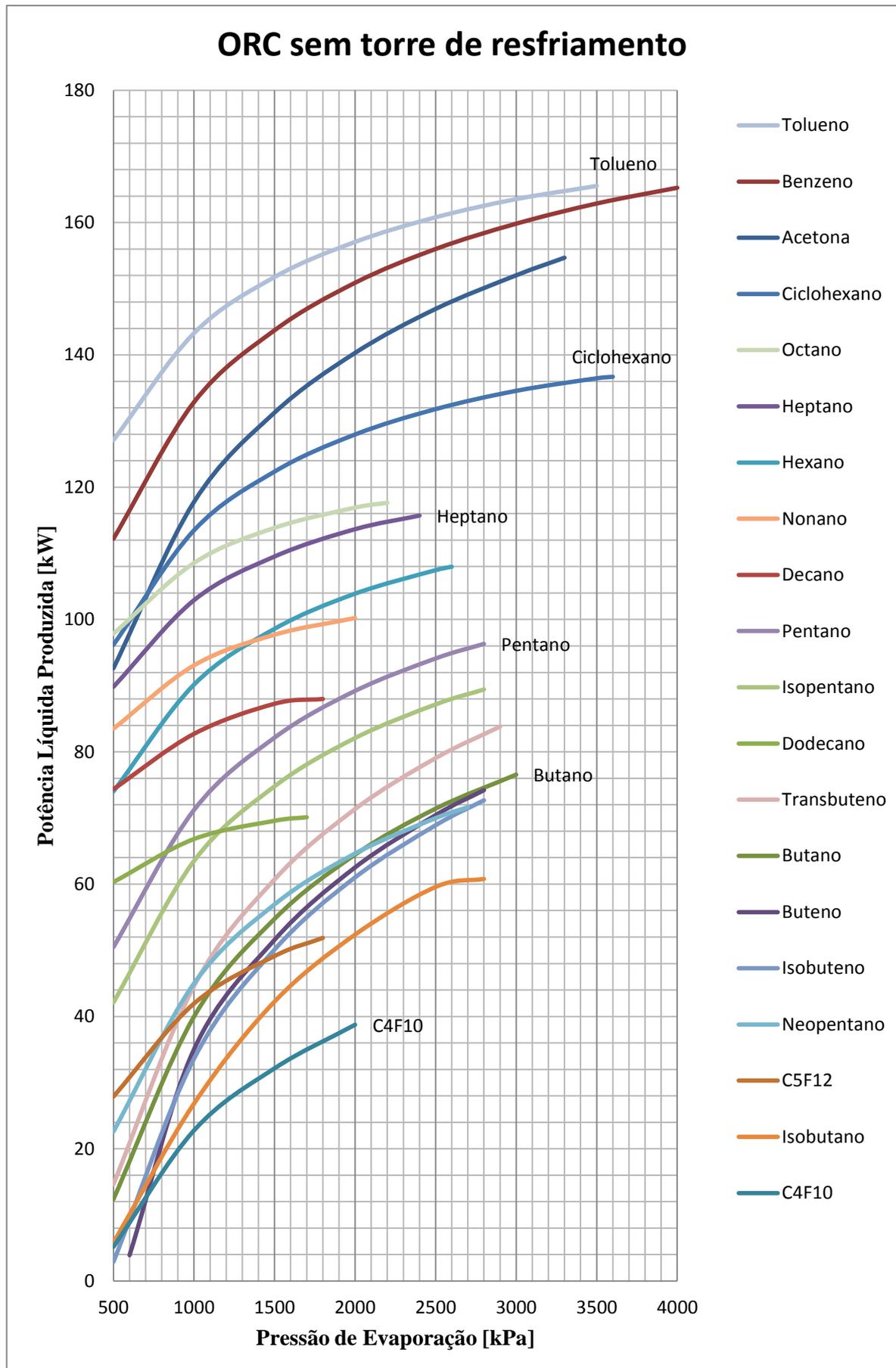
ZHAI. H., SHI. L., NA. Q. **Influence of working fluid properties on system performance and screen evaluation indicators for geothermal ORC (organic Rankine cycle) system.** Energy, v.74, p.2-11, 2014.

ZHANG. H. G., WANG. E. H., FAN. B. Y. **A performance analysis of a novel system of a dual loop bottoming organic Rankine cycle (ORC) with a light-duty diesel engine.** Applied Energy, v.102, p.1504-1513, 2013.

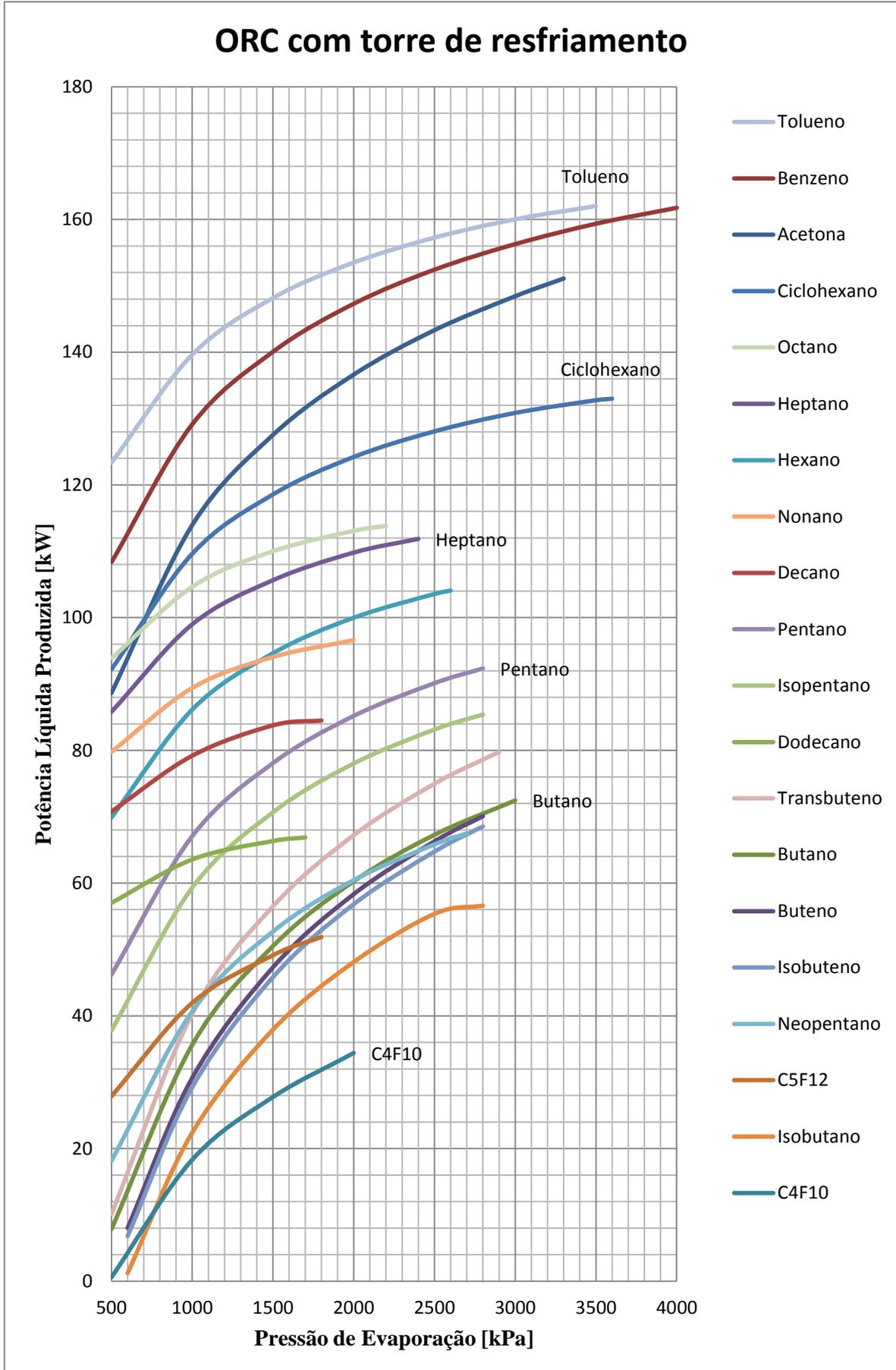
ZHU. S., DENG. K., QU. S. **Energy and exergy analyses of a bottoming Rankine cycle for engine exhaust heat recovery.** Energy, v.58, p.448-457, 2013;

## **APÊNDICE A**



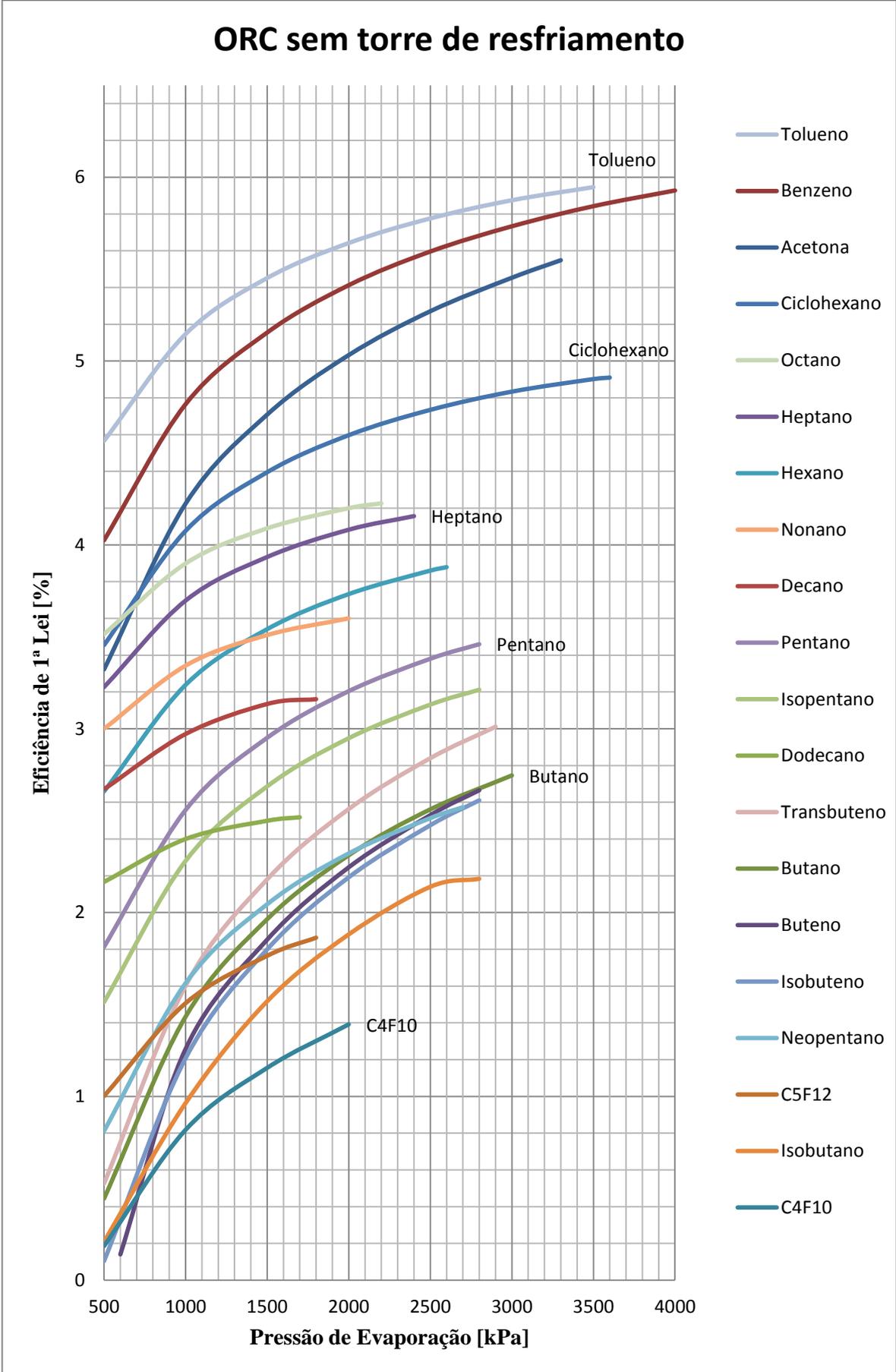


<b>Potência líquida produzida [kW] / ORC sem sistema de resfriamento da água de condensação</b>									
	<b>Fluido orgânico</b>	<b>500 kPa</b>	<b>1.000 kPa</b>	<b>1.500 kPa</b>	<b>2.000 kPa</b>	<b>2.500 kPa</b>	<b>3.000 kPa</b>	<b>3.500 kPa</b>	<b>4.000 kPa</b>
1	Acetona	92,63	117,77	131,27	140,30	146,95	152,03	-----	-----
2	Benzeno	112,21	132,85	143,71	150,90	156,01	159,83	162,88	165,27
3	Butano	12,37	39,97	54,75	64,45	71,41	76,55	-----	-----
4	Buteno	-----	35,01	51,57	62,52	70,43	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	5,17	22,77	32,16	38,75	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	27,89	41,95	49,12	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	96,18	113,48	122,36	127,97	131,80	134,56	136,46	-----
8	Decano	74,36	82,72	87,26	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	60,32	66,82	69,57	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	89,82	102,92	109,52	113,65	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	74,02	90,15	98,59	103,90	107,46	-----	-----	-----
12	Isobutano	5,80	26,82	42,24	52,37	59,57	-----	-----	-----
13	Isobuteno	2,91	33,61	50,10	61,03	68,90	-----	-----	-----
14	Isopentano	42,12	63,49	74,78	82,08	87,17	-----	-----	-----
15	Neopentano	22,60	44,98	56,93	64,63	69,97	-----	-----	-----
16	Nonano	83,50	93,07	97,70	100,23	-----	-----	-----	-----
17	Octano	97,85	108,54	113,86	116,91	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	50,48	71,20	82,14	89,21	94,11	-----	-----	-----
19	Tolueno	127,12	143,28	151,77	157,07	160,80	163,55	165,54	-----
20	Transbuteno	14,64	44,60	60,70	71,35	79,05	-----	-----	-----

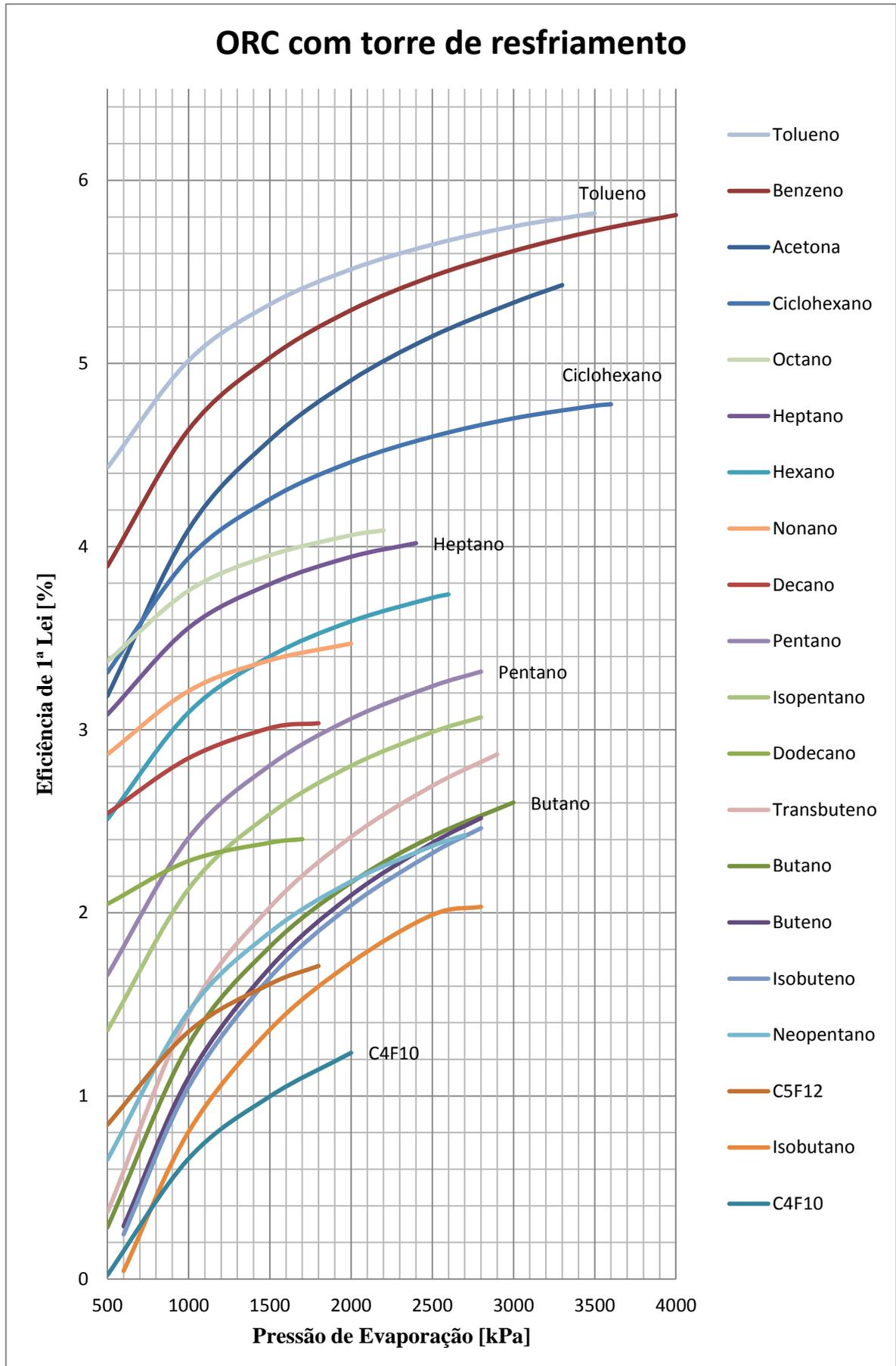


Potência líquida produzida [kW] / ORC com sistema de resfriamento da água de condensação									
	Fluido orgânico	500 kPa	1.000 kPa	1.500 kPa	2.000 kPa	2.500 kPa	3.000 kPa	3.500 kPa	4.000 kPa
1	Acetona	88,65	113,95	127,54	136,62	143,32	148,43	-----	-----
2	Benzeno	108,35	129,13	140,06	147,30	152,44	156,29	159,36	161,76
3	Butano	7,85	35,62	50,50	60,27	67,27	72,45	-----	-----
4	Buteno	-----	30,64	47,30	58,33	66,29	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	0,60	18,31	27,77	34,40	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	27,89	41,95	49,12	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	92,21	109,62	118,57	124,21	128,07	130,85	132,76	-----
8	Decano	70,78	79,19	83,77	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	57,02	63,56	66,34	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	85,81	98,99	105,64	109,80	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	69,90	86,15	94,64	99,99	103,57	-----	-----	-----
12	Isobutano	-----	22,39	37,92	48,11	55,36	-----	-----	-----
13	Isobuteno	-----	29,23	45,83	56,81	64,75	-----	-----	-----
14	Isopentano	37,79	59,31	70,67	78,02	83,14	-----	-----	-----
15	Neopentano	18,14	40,67	52,70	60,45	65,83	-----	-----	-----
16	Nonano	79,77	89,40	94,07	96,61	-----	-----	-----	-----
17	Octano	93,89	104,65	110,01	113,08	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	46,21	67,07	78,08	85,19	90,12	-----	-----	-----
19	Tolueno	123,36	139,62	148,17	153,51	157,26	160,03	162,03	-----
20	Transbuteno	10,13	40,28	56,50	67,22	74,97	-----	-----	-----

## **APÊNDICE B**

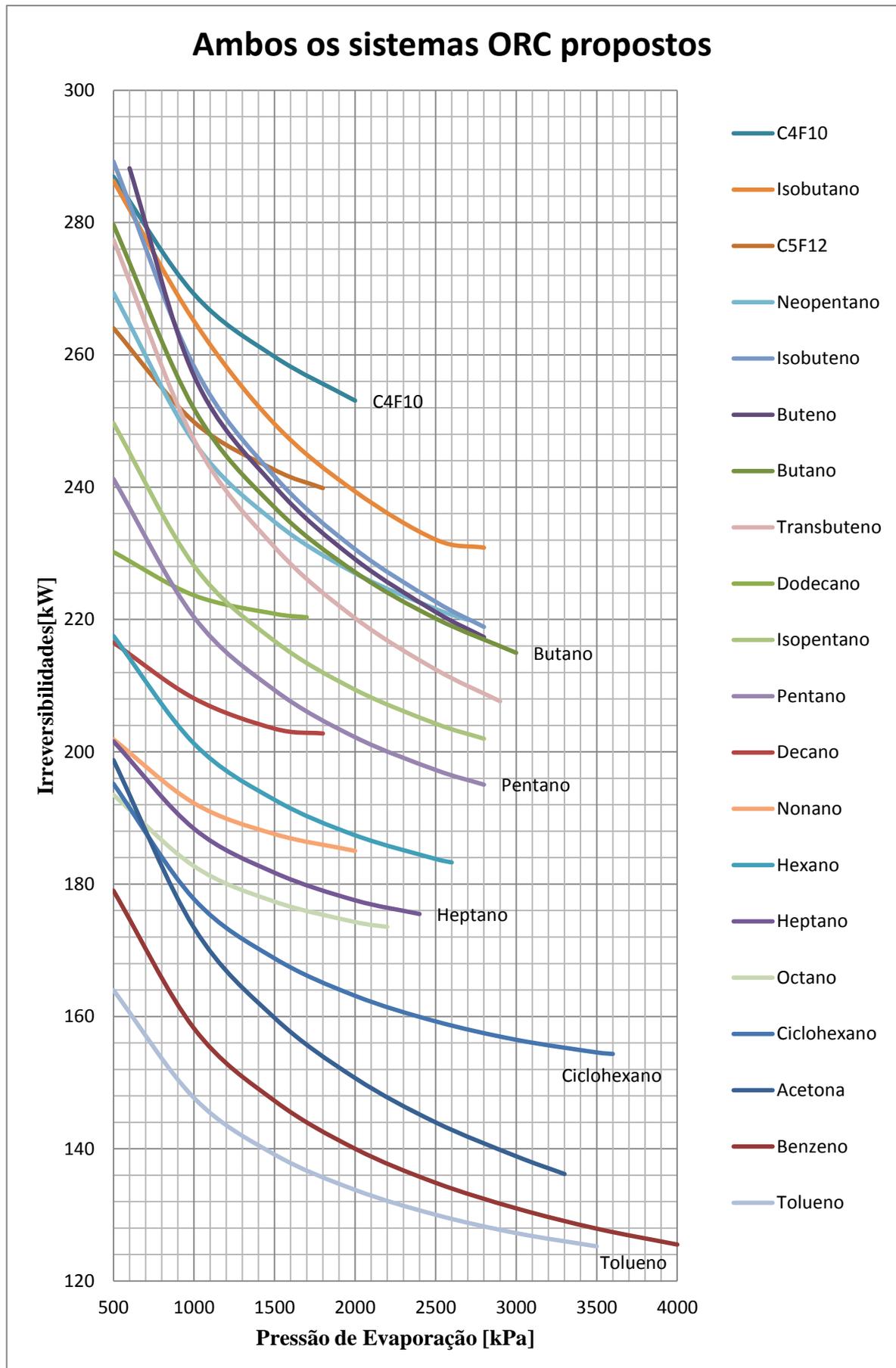


<b>Eficiência de Primeira Lei [%] / ORC sem sistema de resfriamento da água de condensação</b>									
	<b>Fluido orgânico</b>	<b>500 kPa</b>	<b>1.000 kPa</b>	<b>1.500 kPa</b>	<b>2.000 kPa</b>	<b>2.500 kPa</b>	<b>3.000 kPa</b>	<b>3.500 kPa</b>	<b>4.000 kPa</b>
1	Acetona	3,33	4,23	4,72	5,04	5,28	5,46	-----	-----
2	Benzeno	4,03	4,77	5,16	5,42	5,60	5,74	5,85	5,94
3	Butano	0,44	1,44	1,97	2,32	2,56	2,75	-----	-----
4	Buteno	-----	1,26	1,85	2,25	2,53	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	0,19	0,82	1,16	1,39	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	1,00	1,51	1,76	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	3,45	4,08	4,40	4,60	4,73	4,83	4,90	-----
8	Decano	2,67	2,97	3,13	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	2,17	2,40	2,50	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	3,23	3,70	3,93	4,08	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	2,66	3,24	3,54	3,73	3,86	-----	-----	-----
12	Isobutano	0,21	0,96	1,52	1,88	2,14	-----	-----	-----
13	Isobuteno	0,10	1,21	1,80	2,19	2,47	-----	-----	-----
14	Isopentano	1,51	2,28	2,69	2,95	3,13	-----	-----	-----
15	Neopentano	0,81	1,62	2,04	2,32	2,51	-----	-----	-----
16	Nonano	3,00	3,34	3,51	3,60	-----	-----	-----	-----
17	Octano	3,51	3,90	4,09	4,20	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	1,81	2,56	2,95	3,20	3,38	-----	-----	-----
19	Tolueno	4,57	5,15	5,45	5,64	5,78	5,87	5,95	-----
20	Transbuteno	0,53	1,60	2,18	2,56	2,84	-----	-----	-----



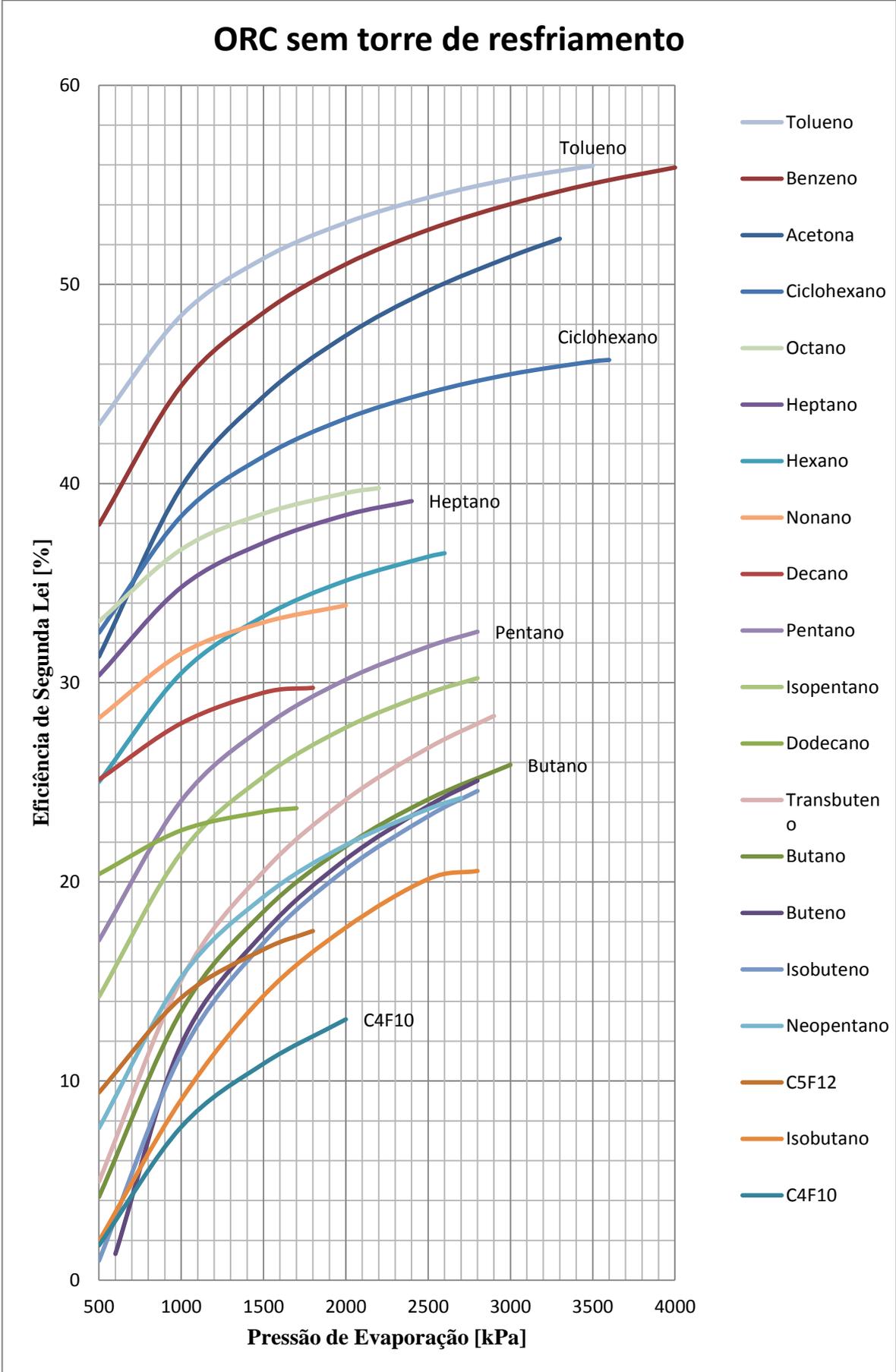
Eficiência de Primeira Lei [%] / ORC com sistema de resfriamento da água de condensação									
	Fluido orgânico	500 kPa	1.000 kPa	1.500 kPa	2.000 kPa	2.500 kPa	3.000 kPa	3.500 kPa	4.000 kPa
1	Acetona	3,18	4,09	4,58	4,91	5,15	5,33	-----	-----
2	Benzeno	3,89	4,64	5,03	5,29	5,48	5,61	5,72	5,81
3	Butano	0,28	1,28	1,81	2,16	2,42	2,60	-----	-----
4	Buteno	0,29	1,10	1,70	2,10	2,38	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	0,02	0,66	1,00	1,24	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	0,84	1,35	1,61	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	3,31	3,94	4,26	4,46	4,60	4,70	4,77	-----
8	Decano	2,54	2,84	3,01	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	2,05	2,28	2,38	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	3,08	3,56	3,79	3,94	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	2,51	3,09	3,40	3,59	3,72	-----	-----	-----
12	Isobutano	-----	0,80	1,36	1,73	1,99	-----	-----	-----
13	Isobuteno	-----	1,05	1,65	2,04	2,33	-----	-----	-----
14	Isopentano	1,36	2,13	2,54	2,80	2,99	-----	-----	-----
15	Neopentano	0,65	1,46	1,89	2,17	2,36	-----	-----	-----
16	Nonano	2,87	3,21	3,38	3,47	-----	-----	-----	-----
17	Octano	3,37	3,76	3,95	4,06	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	1,66	2,41	2,80	3,06	3,24	-----	-----	-----
19	Tolueno	4,43	5,02	5,32	5,51	5,65	5,75	5,82	-----
20	Transbuteno	0,36	1,45	2,03	2,41	2,69	-----	-----	-----

## **APÊNDICE C**

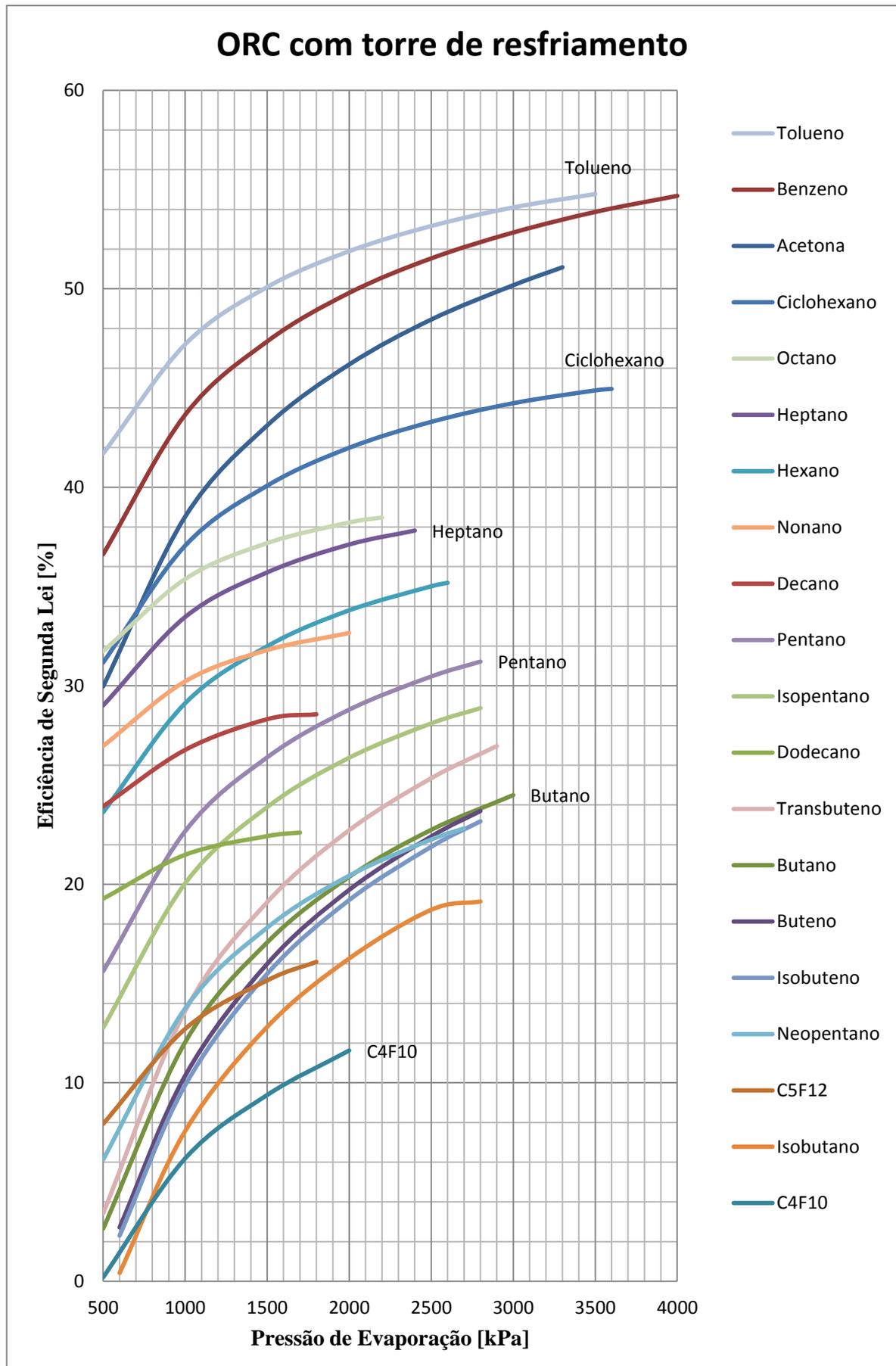


<b>Irreversibilidades [kW] / Ambos os sistemas ORC propostos</b>									
	<b>Fluido orgânico</b>	<b>500 kPa</b>	<b>1.000 kPa</b>	<b>1.500 kPa</b>	<b>2.000 kPa</b>	<b>2.500 kPa</b>	<b>3.000 kPa</b>	<b>3.500 kPa</b>	<b>4.000 kPa</b>
1	Acetona	198,75	173,41	159,79	150,69	143,99	138,87	-----	-----
2	Benzeno	179,01	158,20	147,25	140,00	134,86	131,00	127,92	125,52
3	Butano	279,68	251,86	236,96	227,17	220,16	214,97	-----	-----
4	Buteno	-----	256,85	240,16	229,11	221,14	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	286,94	269,20	259,73	253,09	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	264,04	249,86	242,63	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	195,18	177,74	168,78	163,12	159,26	156,48	154,56	-----
8	Decano	216,52	208,09	203,51	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	230,20	223,65	220,87	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	201,59	188,38	181,73	177,56	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	217,52	201,25	192,75	187,39	183,81	-----	-----	-----
12	Isobutano	-----	265,11	249,56	239,35	232,09	-----	-----	-----
13	Isobuteno	-----	258,26	241,64	230,63	222,69	-----	-----	-----
14	Isopentano	249,69	228,14	216,75	209,39	204,27	-----	-----	-----
15	Neopentano	269,37	246,66	234,75	226,99	221,60	-----	-----	-----
16	Nonano	201,88	192,24	187,57	185,02	-----	-----	-----	-----
17	Octano	193,50	182,72	177,35	174,27	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	241,25	220,36	209,33	202,21	197,27	-----	-----	-----
19	Tolueno	163,98	147,69	139,13	133,78	130,02	127,25	125,25	-----
20	Transbuteno	277,39	247,19	230,95	220,21	212,45	-----	-----	-----

## **APÉNDICE D**

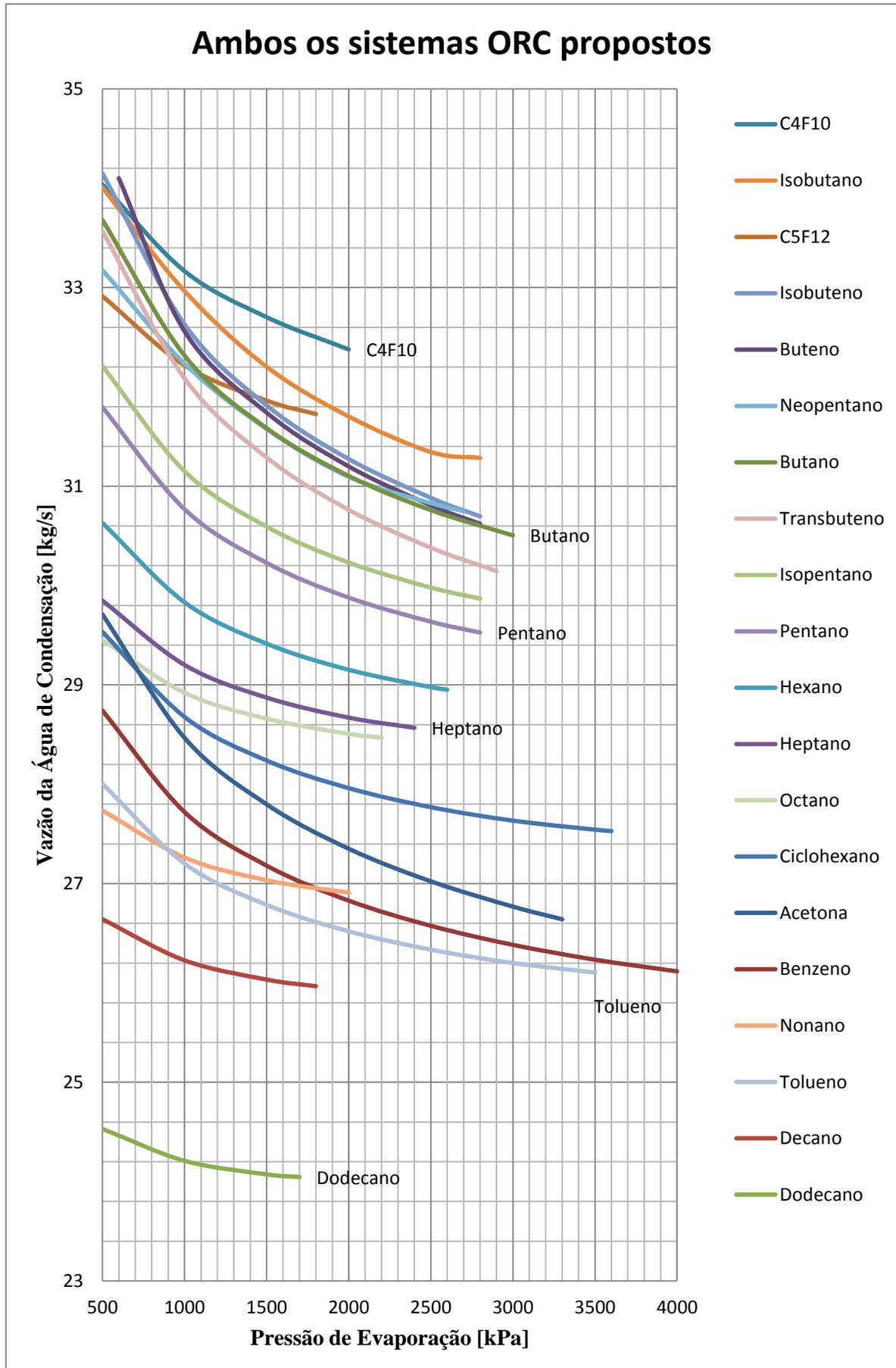


<b>Eficiência de Segunda Lei [%] / ORC sem sistema de resfriamento da água de condensação</b>									
	<b>Fluido orgânico</b>	<b>500 kPa</b>	<b>1.000 kPa</b>	<b>1.500 kPa</b>	<b>2.000 kPa</b>	<b>2.500 kPa</b>	<b>3.000 kPa</b>	<b>3.500 kPa</b>	<b>4.000 kPa</b>
1	Acetona	31,32	39,81	44,38	47,43	49,68	51,39	-----	-----
2	Benzeno	37,93	44,91	48,58	51,01	52,74	54,03	55,06	55,87
3	Butano	4,18	13,51	18,51	21,79	24,14	25,88	-----	-----
4	Buteno	-----	11,84	17,43	21,14	23,81	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	1,75	7,70	10,87	13,10	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	9,43	14,18	16,61	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	32,51	38,36	41,36	43,26	44,56	45,49	46,13	-----
8	Decano	25,14	27,96	29,50	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	20,39	22,59	23,52	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	30,36	34,79	37,02	38,42	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	25,02	30,48	33,32	35,13	36,33	-----	-----	-----
12	Isobutano	1,96	9,07	14,28	17,70	20,14	-----	-----	-----
13	Isobuteno	0,98	11,36	16,94	20,63	23,29	-----	-----	-----
14	Isopentano	14,24	21,46	25,28	27,75	29,47	-----	-----	-----
15	Neopentano	7,64	15,21	19,25	21,85	23,66	-----	-----	-----
16	Nonano	28,23	31,46	33,03	33,88	-----	-----	-----	-----
17	Octano	33,08	36,69	38,49	39,52	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	17,07	24,07	27,77	30,16	31,81	-----	-----	-----
19	Tolueno	42,97	48,44	51,30	53,10	54,36	55,29	55,96	-----
20	Transbuteno	4,95	15,08	20,52	24,12	26,72	-----	-----	-----



Eficiência de Segunda Lei [%] / ORC com sistema de resfriamento da água de condensação									
	Fluido orgânico	500 kPa	1.000 kPa	1.500 kPa	2.000 kPa	2.500 kPa	3.000 kPa	3.500 kPa	4.000 kPa
1	Acetona	29,97	38,52	43,12	46,19	48,45	50,18	-----	-----
2	Benzeno	36,63	43,65	47,35	49,79	51,53	52,83	53,87	54,68
3	Butano	2,65	12,04	17,07	20,37	22,74	24,49	-----	-----
4	Buteno	-----	10,36	15,99	19,72	22,41	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	0,20	6,19	9,39	11,63	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	7,93	12,72	15,16	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	31,17	37,06	40,08	41,99	43,30	44,23	44,88	-----
8	Decano	23,93	26,77	28,32	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	19,28	21,49	22,43	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	29,01	33,47	35,71	37,12	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	23,63	29,12	31,99	33,80	35,01	-----	-----	-----
12	Isobutano	-----	7,57	12,82	16,26	18,72	-----	-----	-----
13	Isobuteno	-----	9,88	15,49	19,21	21,89	-----	-----	-----
14	Isopentano	12,77	20,05	23,89	26,38	28,10	-----	-----	-----
15	Neopentano	6,13	13,75	17,82	20,44	22,25	-----	-----	-----
16	Nonano	26,97	30,22	31,80	32,66	-----	-----	-----	-----
17	Octano	31,74	35,38	37,19	38,23	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	15,62	22,67	26,40	28,80	30,47	-----	-----	-----
19	Tolueno	41,70	47,20	50,09	51,89	53,16	54,10	54,77	-----
20	Transbuteno	3,42	13,62	19,10	22,72	25,34	-----	-----	-----

## **APÊNDICE E**



<b>Vazão da água de condensação [kg/s] / Ambos os sistemas ORC propostos</b>									
	<b>Fluido orgânico</b>	<b>500 kPa</b>	<b>1.000 kPa</b>	<b>1.500 kPa</b>	<b>2.000 kPa</b>	<b>2.500 kPa</b>	<b>3.000 kPa</b>	<b>3.500 kPa</b>	<b>4.000 kPa</b>
1	Acetona	29,71	28,47	27,80	27,35	27,02	26,77	-----	-----
2	Benzeno	28,74	27,72	27,18	26,83	26,58	26,38	26,23	26,12
3	Butano	33,68	32,31	31,58	31,10	30,76	30,50	-----	-----
4	Buteno	-----	32,56	31,74	31,20	30,81	-----	-----	-----
5	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	34,04	33,17	32,70	32,38	-----	-----	-----	-----
6	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	32,91	32,22	31,86	-----	-----	-----	-----	-----
7	Ciclohexano	29,53	28,68	28,24	27,96	27,77	27,63	27,54	-----
8	Decano	26,64	26,23	26,03	-----	-----	-----	-----	-----
9	Dodecano	24,53	24,21	24,07	-----	-----	-----	-----	-----
10	Heptano	29,85	29,20	28,87	28,67	-----	-----	-----	-----
11	Hexano	30,63	29,83	29,41	29,15	28,98	-----	-----	-----
12	Isobutano	34,01	32,97	32,20	31,70	31,34	-----	-----	-----
13	Isobuteno	34,15	32,63	31,81	31,27	30,88	-----	-----	-----
14	Isopentano	32,21	31,15	30,59	30,23	29,98	-----	-----	-----
15	Neopentano	33,17	31,23	31,48	31,09	30,83	-----	-----	-----
16	Nonano	27,74	27,26	27,03	26,91	-----	-----	-----	-----
17	Octano	29,45	28,92	28,66	28,51	-----	-----	-----	-----
18	Pentano	31,79	30,77	30,23	29,88	29,64	-----	-----	-----
19	Tolueno	28,00	27,20	26,79	26,52	26,34	26,20	26,10	-----
20	Transbuteno	33,57	32,09	31,29	30,76	30,38	-----	-----	-----