



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SHIRLEY NAIRA CARVALHO DA SILVA**

**ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PELA  
COGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE CIMENTO - ESTUDO DE CASO**

**RUSSAS**  
**2026**

SHIRLEY NAIRA CARVALHO DA SILVA

ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PELA  
COGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE CIMENTO - ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao  
Programa de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Ceará –  
Campus Russas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Silvia Teles Viana.

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S583a Silva, Shirley Naira Carvalho da.  
Acompanhamento do processo de produção de energia pela cogeração de uma indústria de cimento -  
Estudo de caso / Shirley Naira Carvalho da Silva. – 2026.  
54 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2026.  
Orientação: Prof. Silvia Teles Viana.
1. Cogeração de energia. 2. Manutenção industrial. 3. Indústria cimenteira. 4. Ciclo de Rankine. 5.  
Eficiência térmica. I. Título.

CDD 620.1

---

SHIRLEY NAIRA CARVALHO DA SILVA

ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PELA  
COGERAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA DE CIMENTO - ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao  
Programa de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Ceará –  
Campus Russas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Aprovada em: 22/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Sílvia Teles Viana (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. MSc. Simara Ferreira Borges  
Companhia Industrial de Cimento Apodi

A Deus.

Aos meus familiares, amigos e professores.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por conceder saúde, força, sabedoria, paciência ao longo de toda a trajetória acadêmica, bem como proporcionar o encontro com pessoas essenciais durante esse percurso.

À minha família, em especial à minha avó, Maria das Graças, por todo o esforço e dedicação na formação da pessoa que sou hoje. Agradeço também, de forma especial, às minhas tias Suelda Maria e Maria Solange, que foram as que mais investiram em minha educação e formação. À minha mãe, Maria Sueli, e ao meu pai, Francisco Leomar por me gerarem e proporcionarem a oportunidade de crescer e me formar. Todos foram imprescindíveis pelo apoio incondicional, incentivo constante e compreensão durante os momentos de maior dedicação aos estudos.

Ao meu namorado, David Menezes, e aos meus sogros Francisca Luceni, e Edvan Menezes, pela compreensão, acolhimento, apoio, palavras de incentivo e carinho durante essa etapa tão importante de minha vida acadêmica.

Aos meus amigos da graduação em Engenharia Mecânica, Thayrla Oliveira, Wilker Nsamo, João Victor da Rocha pelo companheirismo, apoio mútuo e parceria ao longo da trajetória acadêmica. Em especial, agradeço a Catarina Nogueira pela parceria em todos os desafios enfrentados durante a graduação, estando sempre presente nos momentos de dificuldade e de superação, proporcionando momentos de leveza tornando essa trajetória mais significativa.

A Companhia Industrial de Cimento Apodi – Unidade de Quixeré, pela oportunidade de estágio e pela confiança na realização deste trabalho. Agradeço especialmente os meus companheiros de trabalho do setor de Planejamento e Controle da Manutenção. Aos colaboradores da área de planejamento: Francisca Tatiane, Anderson e Robinson, pelos ensinamentos, troca de conhecimento e orientações.

Aos inspetores: Francisco Gilvânio, Lázaro Nunes, Belquistor Silveira, Aléx Max e Jackson, pelos ensinamentos proporcionados a mim sobre as áreas da empresa.

Aos colaboradores da área de Confiabilidade: Luiz Carlos do Norte, Sanfis Cesário e Laianny Clemente, pelas instruções, conselhos, oportunidades e confiança em meu trabalho.

Aos demais colaboradores que contribuíram com a realização da pesquisa: Francisco José e Rafael Moura, obrigada pelo tempo disponibilizado para atender as minhas dúvidas. Em especial a Simara Borges, que aceitou fazer parte da banca avaliadora, além do acolhimento, orientação e incentivo à realização dessa pesquisa.

Por fim, aos professores do curso de Engenharia mecânica, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação, dedicação, compromisso com a formação acadêmica e profissional. Em especial a Professora Dra. Silvia Teles, orientadora desta pesquisa, agradeço pela orientação, paciência, oportunidades, conselhos e palavras fortalecedoras, que foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho e meu crescimento acadêmico e profissional.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos” (Martin Luther King).

## RESUMO

A indústria cimenteira é caracterizada pelo elevado consumo energético, tornando a busca da eficiência energética como estratégia para a redução de custos operacionais e impactos ambientais. Nesse contexto, a cogeração de energia destaca-se como uma alternativa eficiente e sustentável por meio do aproveitamento de calor residual dos processos de combustão da produção de cimento. O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do sistema de cogeração de energia de uma indústria cimenteira, através de um estudo de caso desenvolvido na Companhia Industrial de Cimento Apodi – Unidade de Quixeré, na qual é referência na aplicação da tecnologia de recuperação de calor residual (WHRS) para geração de energia elétrica. A metodologia baseou-se na modelagem termodinâmica do ciclo de Rankine, utilizando dados reais de temperatura, pressão e potência, apurados diariamente em períodos anteriores e posteriores às manutenções realizadas em Grande Parada do forno. A partir disso, foram calculadas as eficiências térmicas do sistema para a comparação entre ambos os cenários. Os resultados indicaram melhoria no sistema após as intervenções realizadas, evidenciada pelo aumento da potência máxima gerada de 3,7 MW para 3,9 MW e pelo acréscimo de aproximadamente um ponto percentual na eficiência térmica do ciclo. Conclui-se que as manutenções realizadas contribuíram para um melhor aproveitamento da energia térmica residual e para o aumento da confiabilidade operacional do sistema, salientando a relevância da cogeração como solução estratégica para a indústria.

**Palavras-chave:** Cogeração de energia; manutenção industrial; indústria cimenteira; ciclo de Rankine; eficiência térmica.

## ABSTRACT

The cement industry is characterized by high energy consumption, making the pursuit of energy efficiency a strategy for reducing operating costs and environmental impacts. In this context, energy cogeneration stands out as an efficient and sustainable alternative by utilizing waste heat from the combustion processes involved in cement production. The objective of this study is to analyze the performance of the energy cogeneration system of a cement industry through a case study developed at Companhia Industrial de Cimento Apodi – Quixeré Unit, which is a reference in the application of waste heat recovery technology (WHRS) for electricity generation. The methodology was based on thermodynamic modeling of the Rankine cycle, using real temperature, pressure, and power data collected daily before and after maintenance performed during a major shutdown of the kiln. Based on this, the thermal efficiencies of the system were calculated to compare both scenarios. The results indicated improvement in the system after the interventions, evidenced by an increase in maximum power generated from 3.7 MW to 3.9 MW and an increase of approximately one percentage point in the thermal efficiency of the cycle. It can be concluded that the maintenance carried out contributed to better use of residual thermal energy and increased the operational reliability of the system, highlighting the relevance of cogeneration as a strategic solution for the industry.

**Keywords:** Cogeneration; industrial maintenance; cement industry; Rankine cycle; thermal efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                              |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – Ilustração esquemática de um ciclo <i>Topping</i> de cogeração .....                                       | 5  |
| Figura 2  | – Ilustração esquemática de um ciclo <i>Bottoming</i> de cogeração .....                                     | 6  |
| Figura 3  | – Representação do ciclo de Rankine e diagrama T-s .....                                                     | 7  |
| Figura 4  | – Ilustração esquemática de uma caldeira flamotubular .....                                                  | 8  |
| Figura 5  | – Ilustração esquemática de uma caldeira aquatubular .....                                                   | 9  |
| Figura 6  | – Ilustração de uma vista em corte de um superaquecedor de uma caldeira<br>do tipo aquatubular .....         | 10 |
| Figura 7  | – Ilustração de uma caldeira aquatubular com Economizador Integral .....                                     | 11 |
| Figura 8  | – Ilustração esquemática de um pré-aquecedor de ar .....                                                     | 11 |
| Figura 9  | – Ilustração técnica de uma turbina a vapor de condensação .....                                             | 12 |
| Figura 10 | – Diagrama de fluxos do Sistema de Cogeração da Unidade .....                                                | 16 |
| Figura 11 | – Caldeira AQC ( <i>Air Quenching Cooler</i> ) da Unidade .....                                              | 18 |
| Figura 12 | – Caldeira SP ( <i>Suspension Preheater</i> ) da Unidade .....                                               | 19 |
| Figura 13 | – Diagrama esquemático do Circuito de geração de vapor das Caldeiras<br>AQC e SP .....                       | 20 |
| Figura 14 | – Turbina a vapor e Gerador de energia da Unidade .....                                                      | 21 |
| Figura 15 | – Condensador de vapor da Unidade .....                                                                      | 22 |
| Figura 16 | – Circuito de condensação do vapor da Unidade .....                                                          | 23 |
| Figura 17 | – Bombas de alta pressão do sistema .....                                                                    | 23 |
| Figura 18 | – Desaerador de água da Unidade .....                                                                        | 24 |
| Figura 19 | – Tanque de desmineralização da Unidade .....                                                                | 24 |
| Figura 20 | – Delimitação temporal de tempo da Grande Parada (GP) e períodos<br>operacionais durante o ano de 2025 ..... | 25 |
| Figura 21 | – Parâmetros de operação de produção de energia com geração de 3,7 MW<br>de potência .....                   | 28 |
| Figura 22 | – Parâmetros de operação de produção de energia com geração de 3,9 MW<br>de potência .....                   | 30 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|           |                                                                                    |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 | – Geração de energia por mês acima de 2,9 MW .....                                 | 31 |
| Gráfico 2 | – Frequência de geração de energia entre 2,9 MW e 3,9 MW – Antes e após a GP ..... | 32 |
| Gráfico 3 | – Geração acima de 2,9 MW de potência – Antes da GP X Após a GP .....              | 32 |
| Gráfico 4 | – MTBF acumulado anual do sistema de Cogeração da Unidade .....                    | 33 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Distribuição das Unidades da Companhia Industrial de Cimento Apodi ..... | 14 |
| Tabela 2 – Distribuição de compartimentos da Caldeira AQC .....                     | 17 |
| Tabela 3 – Distribuição de compartimentos da Caldeira SP .....                      | 19 |
| Tabela 4 – Potência elétrica gerada nos períodos anterior e posterior a GP .....    | 28 |
| Tabela 5 – Eficiência térmica do ciclo de Rankine ideal x Potência gerada .....     | 30 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| CHP  | <i>Combined Heat and Power</i>     |
| WHRS | <i>Waste Heat Recovery Systems</i> |
| GP   | Grande Parada                      |
| AQC  | <i>Air Quenching Cooler</i>        |
| SP   | <i>Suspension Preheater</i>        |
| MW   | Megawatt                           |
| KW   | Quilowatt                          |
| MPa  | Megapascal                         |
| KPa  | Quilopascal                        |
| MTBF | <i>Mean Time Between Failures</i>  |
| KPI  | <i>Key Performance Indicator</i>   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |                                                      |
|-----------|------------------------------------------------------|
| $\eta_t$  | Eficiência térmica do ciclo Rankine (%)              |
| $h_1$     | Entalpia do fluido de entrada na bomba (kJ/Kg)       |
| $h_2$     | Entalpia do fluido de entrada na caldeira (kJ/Kg)    |
| $h_3$     | Entalpia do fluido de entrada na turbina (kJ/Kg)     |
| $h_4$     | Entalpia do fluido de entrada no condensador (kJ/Kg) |
| $q_{ent}$ | Energia térmica fornecida ao sistema (kJ/Kg)         |
| $q_{sai}$ | Energia térmica rejeitada (kJ/Kg)                    |
| $w_{liq}$ | Trabalho líquido (kJ/Kg)                             |
| $w_{ent}$ | Trabalho consumido (kJ/Kg)                           |
| $w_{sai}$ | Trabalho produzido (kJ/Kg)                           |

## SUMÁRIO

|                |                                                                                                                      |           |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                              | <b>1</b>  |
| <b>2</b>       | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                                                               | <b>3</b>  |
| <b>2.1</b>     | <b>Objetivo Geral .....</b>                                                                                          | <b>3</b>  |
| <b>2.2</b>     | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                                                                   | <b>3</b>  |
| <b>3.</b>      | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                                                                   | <b>4</b>  |
| <b>3.1</b>     | <b>Cogeração de energia .....</b>                                                                                    | <b>4</b>  |
| <b>3.1.1</b>   | <b><i>Configuração Topping</i> .....</b>                                                                             | <b>5</b>  |
| <b>3.1.2</b>   | <b><i>Configuração Bottoming</i> .....</b>                                                                           | <b>5</b>  |
| <b>3.2</b>     | <b>Descrição do Ciclo Rankine .....</b>                                                                              | <b>6</b>  |
| <b>3.3</b>     | <b>Componentes principais do sistema de cogeração .....</b>                                                          | <b>7</b>  |
| <b>3.3.1</b>   | <b><i>Caldeira</i> .....</b>                                                                                         | <b>8</b>  |
| <b>3.3.1.1</b> | <b><i>Superaquecedores</i> .....</b>                                                                                 | <b>9</b>  |
| <b>3.3.1.2</b> | <b><i>Economizadores</i> .....</b>                                                                                   | <b>10</b> |
| <b>3.3.1.3</b> | <b><i>Pré-aquecedores</i> .....</b>                                                                                  | <b>11</b> |
| <b>3.3.2</b>   | <b><i>Turbina a vapor</i> .....</b>                                                                                  | <b>12</b> |
| <b>4</b>       | <b>METODOLOGIA .....</b>                                                                                             | <b>13</b> |
| <b>4.1</b>     | <b>A Pesquisa .....</b>                                                                                              | <b>13</b> |
| <b>4.2</b>     | <b>Variáveis .....</b>                                                                                               | <b>14</b> |
| <b>4.3</b>     | <b>Local utilizado para a pesquisa .....</b>                                                                         | <b>14</b> |
| <b>4.4</b>     | <b>Panorama do sistema de cogeração de energia da CIA Industrial de<br/>Cimento Apodi - Unidade de Quixeré .....</b> | <b>15</b> |
| <b>4.4.1</b>   | <b><i>Síntese do Sistema</i> .....</b>                                                                               | <b>15</b> |
| <b>4.4.2</b>   | <b><i>Circuito de geração de vapor e de Energia Elétrica</i> .....</b>                                               | <b>16</b> |
| <b>4.4.2.1</b> | <b><i>Caldeira AQC (Air Quenching Cooler)</i> .....</b>                                                              | <b>17</b> |
| <b>4.4.2.2</b> | <b><i>Caldeira SP (Suspension Preheater)</i> .....</b>                                                               | <b>18</b> |
| <b>4.4.3</b>   | <b><i>Turbina e gerador elétrico: Geração de energia Elétrica</i> .....</b>                                          | <b>21</b> |
| <b>4.4.4</b>   | <b><i>Condensador, água de recirculação e sistema de bombeamento</i> .....</b>                                       | <b>21</b> |
| <b>4.4.4.1</b> | <b><i>Condensação do vapor</i> .....</b>                                                                             | <b>21</b> |
| <b>4.4.4.2</b> | <b><i>Água de recirculação do sistema</i> .....</b>                                                                  | <b>23</b> |
| <b>4.4.4.3</b> | <b><i>Desaerador de água de alimentação das caldeiras</i> .....</b>                                                  | <b>23</b> |

|            |                                                                           |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.5</b> | <b>Análise .....</b>                                                      | <b>24</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Modelagem Termodinâmica do Ciclo .....</b>                             | <b>25</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS .....</b>                                                   | <b>28</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Eficiência Térmica do sistema antes das manutenções previstas.....</b> | <b>28</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Eficiência Térmica do sistema após as manutenções realizadas.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Estudo de caso: Comparativo de Eficiências .....</b>                   | <b>30</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                    | <b>34</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Sugestões de trabalhos futuros .....</b>                               | <b>35</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                  | <b>36</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira é um dos setores que mais consomem energia globalmente. Assim como os setores petroquímicos, siderúrgicos entre outros, uma cimenteira demanda intensivamente grandes quantidades de energia térmica e elétrica em seus processos como a moagem e a calcinação.

De acordo com Bezerra (2011), o desenvolvimento sustentável está diretamente associado à adoção de práticas voltadas à eficiência energética, que se baseia no conceito de manter o mesmo nível de produção com um consumo de energia reduzido. Esse objetivo pode ser alcançado através do gerenciamento contínuo da energia, da utilização de tecnologias mais modernas e eficientes, da conscientização dos usuários quanto à economia de energia e do comprometimento das empresas com a busca por uma utilização mais racional dos recursos energéticos.

Nesse contexto, a Cogeração destaca-se como uma tecnologia capaz de promover a conservação de energia, contribuindo para a diminuição do consumo e da dependência de combustíveis fósseis, além de combater o desperdício energético. Essa tecnologia apresenta elevada eficiência na produção de energia elétrica confiável e de baixo custo, principalmente quando adotada por indústrias com grande disponibilidade de calor residual (SANTOS; NOVO, 2008).

A busca pela eficiência energética no Brasil e no mundo tornou-se um dos principais objetivos industriais, pois trata-se da necessidade de reduzir custos com energia ao adotar medidas sustentáveis, como a implantação de sistemas de energias renováveis, além da redução dos impactos ambientais.

Dentro desse contexto, Brasil (2005) esclarece que a vantagem de um sistema de cogeração é o maior aproveitamento de energia, o que contribui para a redução dos custos de produção. Em vista disso, a cogeração de energia é considerada uma alternativa altamente eficiente, principalmente em plantas cimenteiras, uma vez que aproveita a carga térmica residual, gerada nos processos de fabricação de cimento para produzir parte da energia elétrica industrial.

Para o eficiente e seguro funcionamento de um sistema de cogeração, os equipamentos que o compõem exigem atenção especial. Um sistema com baixa eficiência, é considerado um sistema cujo os equipamentos trabalham com dificuldades, não utilizando a totalidade de sua função - seja por influências ou internas, como a contaminação de óleo

lubrificante em turbinas ou bombas, ou externas, como incrustação em trocadores de calor e tubulações, por exemplo.

Em caso de incrustações, a deposição de sais e impurezas nas superfícies de troca térmica estão relacionadas à qualidade da água de processo. Quando inadequada, essa condição favorece a formação dessas deposições, que atuam como uma barreira térmica, aumentando a resistência à transferência de calor.

Esses fatores afetam negativamente o processo de produção de energia ao comprometer a troca térmica realizada no Ciclo Rankine do sistema, o que causa elevação do consumo de energia necessária para movimentar o fluido de trabalho reduzindo assim o rendimento global da cogeração.

Neste contexto, o presente estudo de caso é justificado pela relevância de se analisar, através de dados obtidos em atividade usados em cálculos de eficiência térmica, os impactos de manutenções na eficiência de sistemas de cogeração, visando além de ganhos energéticos e econômicos, a redução de impactos ambientais gerados em indústrias cimenteiras

## **2 OBJETIVOS**

Este tópico contém o objetivo principal desse estudo de caso, assim como os objetivos específicos desta pesquisa.

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desse estudo de caso é analisar o desempenho do sistema de cogeração de uma cimenteira, baseado no ciclo Rankine, com foco na eficiência térmica do processo antes e após as manutenções em seus componentes.

### **2.2 Objetivos Específicos**

A fim de atender ao objetivo geral proposto e orientar o desenvolvimento deste estudo, foram definidos os objetivos específicos, sendo eles:

- Descrever o funcionamento do sistema de cogeração da cimenteira e reconhecimento do ciclo Rankine no circuito;
- Identificar os fluxos de água e de vapor no sistema de cogeração da planta;
- Coletar dados operacionais antes e após as manutenções executadas em Parada de Forno;
- Comparar cenários antes e após as substituições e reparos pontuais nos componentes do sistema;
- Evidenciar a importância da execução de manutenções periódicas no sistema, tendo em vista os ganhos de eficiência;
- Apresentar métodos para aumentar a eficiência do ciclo Rankine.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma breve fundamentação teórica sobre a Cogeração de energia, abordando suas configurações e os componentes principais do sistema.

#### 3.1 Cogeração de energia

De acordo com a Enel (s.d.), a cogeração, ou CHP (*Combined Heat and Power*), é um sistema que permite a produção e a utilização simultânea de energia elétrica e energia térmica (calor). Andreos (2013) afirma que o objetivo principal da cogeração é aproveitar ao máximo a energia presente na fonte primária, promovendo o uso mais eficiente e racional do combustível, com o aumento da eficiência do processo e redução dos custos com a geração de energia.

Devido ao custo unitário da geração própria de energia ser menor comparada à energia disponibilizada pela rede elétrica, muitas fábricas de cimento optam pela instalação de sistemas internos de geração de energia. Ademais, diversas indústrias do setor têm investido em sistemas de recuperação de calor residual, nos quais a energia térmica nos gases de exaustão do forno e do resfriador de clínquer é aproveitada na geração de energia elétrica, reduzindo as perdas para a atmosfera. Esses sistemas são conhecidos como Sistemas de Recuperação de Calor Residual (*Waste Heat Recovery Systems - WHRS*) (IEEPL, s.d.)

A Companhia Industrial de Cimento Apodi - Unidade de Quixeré é reconhecida como a única indústria cimenteira das Américas que opera com a tecnologia WHRS, demonstrando um destaque tecnológico e inovador no seguimento da eficiência energética industrial (AECIPP, s.d.).

Um sistema de cogeração depende, segundo Uliani (2017), de equipamentos que realizam a queima de combustíveis, possibilitando o aproveitamento da energia térmica liberada no processo de combustão para a produção de trabalho mecânico. Em sistemas que dispõem de caldeiras, o vapor gerado é utilizado para acionar turbinas, caracterizando a tecnologia denominada como ciclo a vapor. Além disso, existem duas configurações básicas de cogeração: O ciclo Inferior, denominado *Bottoming*, e o ciclo superior, denominado *Topping*.

### 3.1.1 Configuração Topping

Segundo Silveira (1994), na configuração *topping*, os fluxos de calor em temperaturas mais elevadas são utilizados inicialmente para a produção de energia elétrica ou mecânica do próprio ciclo. A partir disso, o calor rejeitado pelo sistema de geração de potência é, posteriormente, aproveitado para atender à demanda de energia térmica do processo produtivo.

A Figura 1 representa uma ilustração adaptada por Mello (2019), após referenciar os conceitos de Nogueira et al. (1997), de um ciclo de configuração *topping*.

Figura 1 – Ilustração esquemática de um ciclo *Topping* de cogeração



Fonte: Adaptado de Mello (2019), baseado em Nogueira et al. (1997).

### 3.1.2 Configuração Bottoming

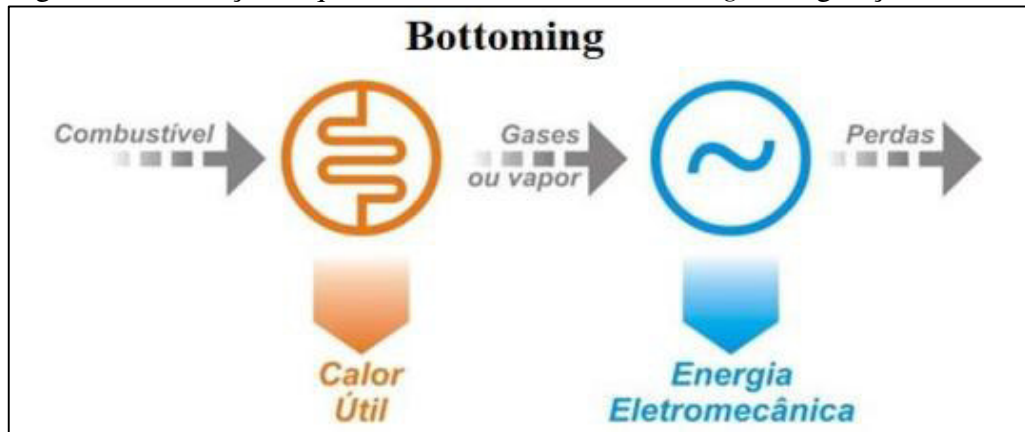
O ciclo *Bottoming* (Figura 2) diferencia-se do ciclo *topping* uma vez que, nessa configuração, a energia térmica rejeitada por um processo industrial é usada para a produção de energia elétrica enquanto, no ciclo *topping*, a energia elétrica ou mecânica é gerada anteriormente à térmica.

“As tecnologias em regime *bottoming* são mais adequadas para instalações produtoras de cimento, vidro e refratários e indústrias metalúrgicas primárias (alumínio, cobre e aço), intermediárias e finais” (MOGAWER, 2005, p. 38).

Em casos de fábricas de cimento, a energia térmica aproveitada é advinda das reações químicas endotérmicas do processo de clinquerização no forno rotativo (CAMPOS, s.d.).

Dessa forma, os gases que seriam liberados para a atmosfera são reaproveitados, contribuindo com a redução da poluição atmosférica e a geração de energia para a fábrica.

Figura 2 – Ilustração esquemática de um ciclo *Bottoming* de cogeração



Fonte: Adaptado de Mello (2019), baseado em Nogueira et al. (1997).

### 3.2 Descrição do Ciclo Rankine

De acordo com Borgnakke e Sonntag (2013), “O Ciclo Rankine é o modelo ideal para centrais térmicas a vapor utilizadas na produção de potência”.

Çengel e Boles (2013), definem o ciclo Rankine como um ciclo de potência a vapor, cujo o fluido de trabalho é alternadamente vaporizado e condensado. No ciclo de Rankine ideal, considera-se quatro processos principais como processos reversíveis internamente, consistindo em:

- 1 - 2: Bombeamento (compressão isentrópica na bomba)

Nessa etapa, o fluido de trabalho, na forma líquida comprimida, sofre um aumento da pressão com a injeção de trabalho, e consequentemente aumento da temperatura.

- 2 - 3: Adição de calor à pressão constante ao gerador de vapor (caldeira).

O fluido pressurizado entra na caldeira, onde ocorre a conversão de líquido para vapor através da adição de calor no sistema à pressão constante (processo isobárico).

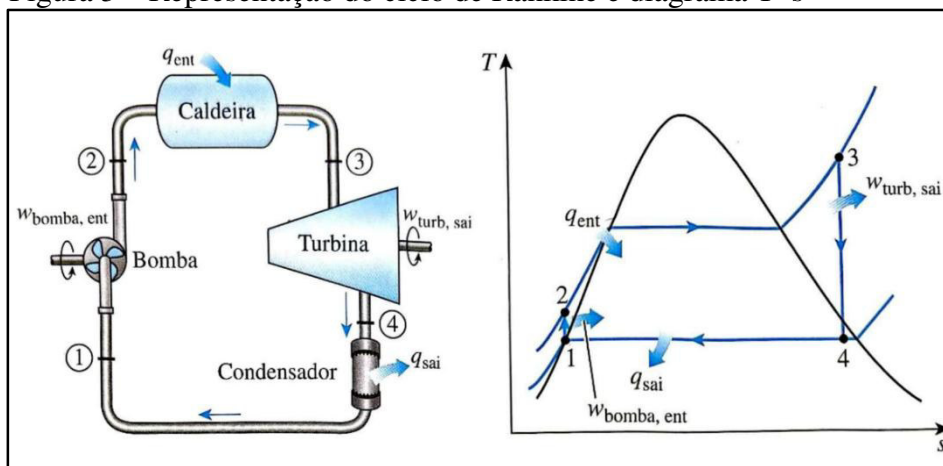
- 3 - 4: Expansão isentrópica na turbina.

O vapor que é superaquecido na etapa anterior, é expandido na turbina, produzindo trabalho mecânico, enquanto sua pressão e temperatura diminuem.

➤ 4 - 1: Dissipação de calor no condensador à pressão constante.

A água retorna a seu estado inicial (estado líquido) através da troca térmica no componente. Esse processo completa o ciclo, reiniciando a operação com o retorno do fluido à bomba. A Figura 3 representa as etapas do processo, nas quais são mostradas no diagrama T-s.

Figura 3 – Representação do ciclo de Rankine e diagrama T-s



Fonte: Adaptado de ÇENGEL e BOLES (2013, p. 559).

O rendimento do ciclo de Rankine depende das temperaturas médias em que o calor é fornecido ao sistema e rejeitado ao meio externo. Em outras palavras, quanto maior for a temperatura média de calor fornecida no processo e menor a temperatura média de rejeição, maior será a eficiência do ciclo, devido ao melhor aproveitamento térmico nessas condições (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2013).

### 3.3 Componentes principais do sistema de cogeração

Barbeli (2015) destaca que sistemas de cogeração de energia podem apresentar diversos níveis de complexidade, variando de acordo com o tipo de tecnologia empregada e com a demanda da planta industrial. Esses sistemas podem envolver desde configurações mais simples, que utilizam caldeiras convencionais associadas a turbinas a vapor, até arranjos mais avançados, que utilizam turbinas a gás.

Uma vez que os sistemas de cogeração operam com base em ciclos termodinâmicos, destaca-se o ciclo de Rankine mais frequentemente empregado. Em sua configuração básica,

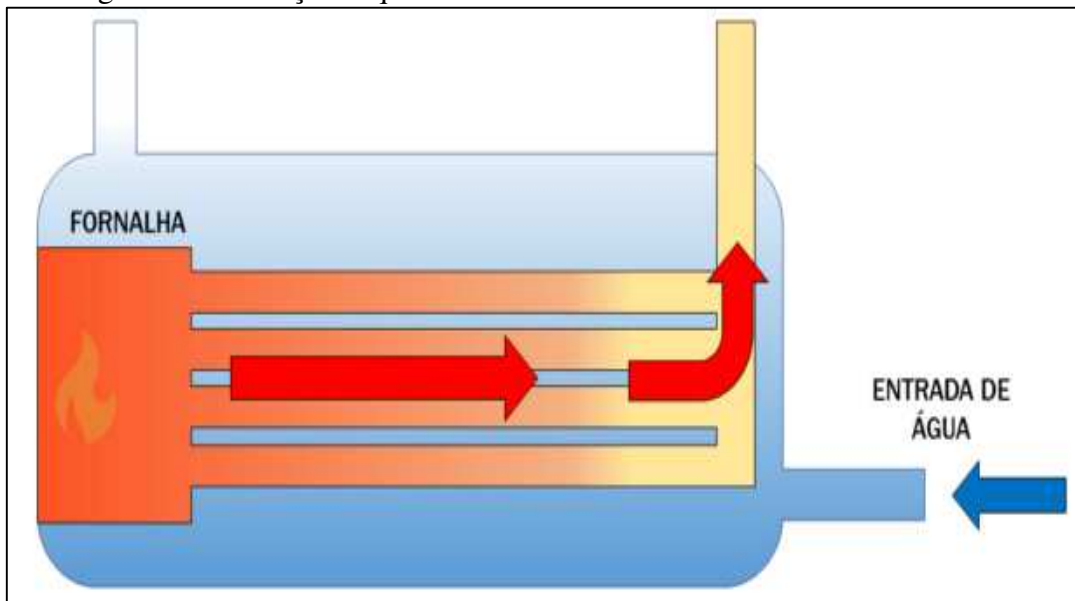
esse ciclo é constituído por quatro dispositivos fundamentais: um gerador de vapor, geralmente caldeira, uma turbina, um condensador e uma bomba (PANOSSO, 2003).

### 3.3.1 Caldeira

A caldeira é um equipamento de alta relevância nos sistemas de geração de potência, pois suas condições de operação influenciam diretamente na eficiência global do ciclo termodinâmico. Conforme destacado por Shapiro, Moran e Boettner (2014), quanto maior for a temperatura média na qual a energia é adicionada ao fluido de trabalho por transferência de calor, maior será a eficiência do ciclo, salientando a importância do controle das condições operacionais desse equipamento.

De acordo com Martinelli (2003), as caldeiras podem ser classificadas em dois tipos principais: flamotubulares e aquatubulares. Nas caldeiras flamotubulares (Figura 4), os gases da combustão percorrem o interior de seus tubos, os quais são imersos em água.

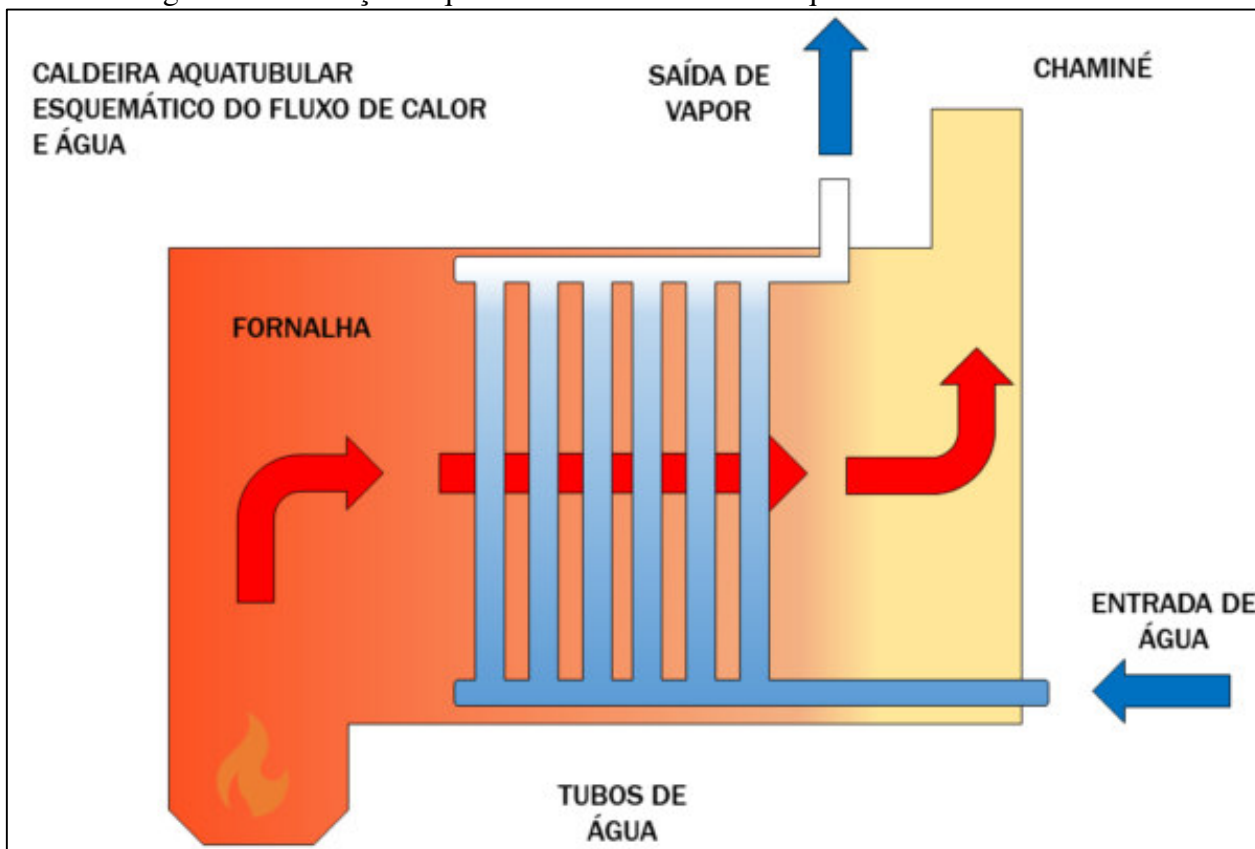
Figura 4 – Ilustração esquemática de uma caldeira flamotubular



Fonte: Adaptado de Togawa Engenharia

Já nas caldeiras aquatubulares (Figura 5), a água circula no interior dos tubos, enquanto os gases quentes passam por sua superfície externa, sendo o tipo de caldeira mais indicado para aplicações que exigem maiores rendimentos.

Figura 5 – Ilustração esquemática de uma caldeira aquatubular



Fonte: Adaptado de Togawa Engenharia (s.d.).

Segundo Mogawer (2005), os sistemas de geração de vapor são compostos por diversos dispositivos para uma eficiente troca térmica, como condensadores, preaquecedores, economizadores e superaquecedores. Dentre esses componentes, as caldeiras destacam-se como equipamento principal, por serem responsáveis pela conversão da energia térmica proveniente da combustão em energia térmica do vapor, que será utilizada em processos de geração de potência, como nos sistemas de cogeração de energia.

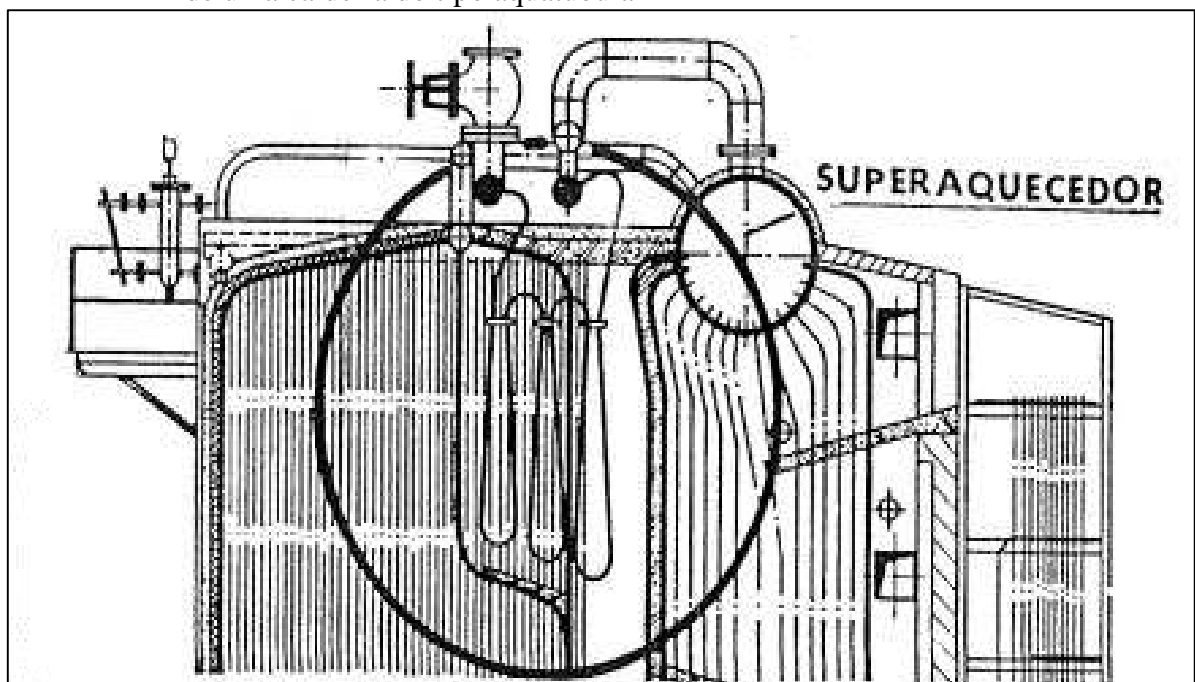
#### 3.3.1.1 Superaquecedores

No interior do corpo das caldeiras, o vapor formado se mantém em equilíbrio em fase líquida à temperatura de vaporização (em estado de vapor saturado). Ao adicionar a esse vapor mais calor, mantendo a mesma pressão interna, eleva-se a temperatura acima da

temperatura de vaporização, convertendo o fluido para estado de vapor superaquecido. Os aparelhos que permitem essa conversão, são os chamados superaquecedores.

Os superaquecedores podem ser classificados como superaquecedores dependentes, dos quais fazem parte do próprio gerador de vapor; e os independentes, que são separados das caldeiras, instalados como fornalhas próprias. No primeiro caso, ele é localizado logo após a primeira passagem dos gases (PERA, 1990). A Figura 6 ilustra um superaquecedor de uma caldeira do tipo aquatubular.

Figura 6 – Ilustração de uma vista em corte de um superaquecedor de uma caldeira do tipo aquatubular



Fonte: Adaptado de: PERA, Hildo. Geradores de vapor. São Paulo: Fama, 1990.

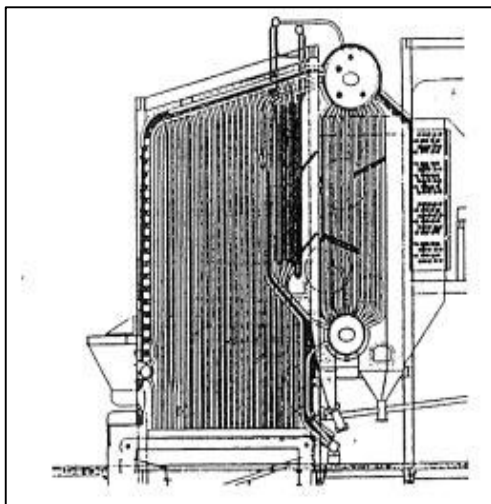
### 3.3.1.2 Economizadores

Os economizadores, de acordo com Pera (1990) são mecanismos destinados a elevar a temperatura da água de alimentação, antes de sua injeção no interior da caldeira, aproveitando o calor sensível restante dos gases de combustão após passar pelas últimas seções da caldeira.

Desse modo, a água entra na caldeira já em temperaturas próximas a de vaporização, estabilizando o regime de pressão de trabalho, contribuindo para o aumento da eficiência térmica do equipamento.

Os economizadores localizam-se logo após a última superfície de convecção da caldeira. A Figura 7 representa um exemplo de economizador.

Figura 7 – Ilustração de uma caldeira aquatubular com Economizador Integral

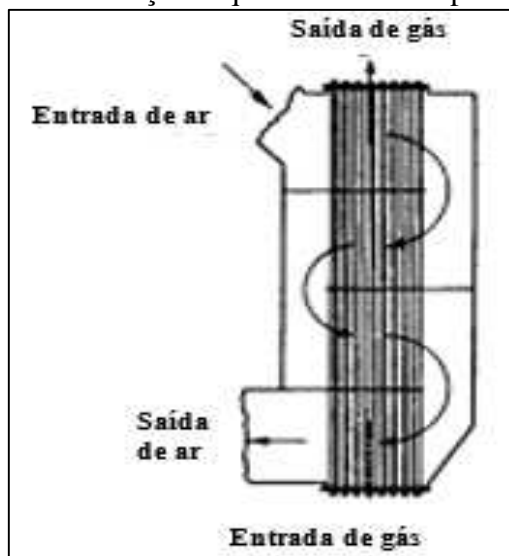


Fonte: Adaptado de: PERA, Hildo. Geradores de vapor. São Paulo: Fama, 1990.

### 3.3.1.3 Pré-aquecedores

Segundo Bizzo (s.d.), os pré-aquecedores de ar (Figura 8) têm a função de elevar a temperatura do ar de combustão antes de sua entrada nos queimadores ou na fornalha, através da troca de calor com os gases de combustão da caldeira. Esse processo contribui para o aumento do rendimento do sistema, pela redução de perdas nos gases de exaustão.

Figura 8 – Ilustração esquemática de um pré-aquecedor de ar



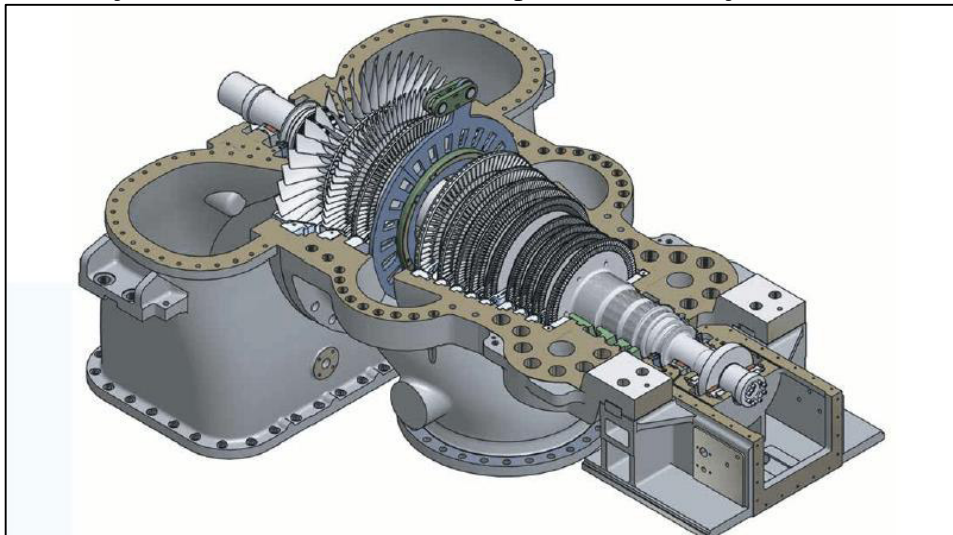
Fonte: Adaptado de Bizzo (s.d.).

### 3.3.2 Turbina a vapor

A turbina a vapor é um equipamento que converte a energia térmica do vapor em energia mecânica, operando, em geral, segundo o ciclo de Rankine (ciclo a vapor).

As turbinas podem ser classificadas como turbina de contrapressão, nas quais a pressão de saída é superior à atmosférica, e turbinas de condensação (Figura 9), em que a pressão de saída é menor que a pressão atmosférica, trabalhando em ciclo fechado e necessitando de um gerador de vapor, normalmente uma caldeira (LEITE, 2019).

Figura 9 – Ilustração técnica de uma turbina a vapor de condensação – material da Turbivap.



Fonte: Adaptado Turbivap (s.d.).

De acordo com Brasil (2005), a turbina a vapor apresenta vantagem significativa em relação à turbina a gás no que se refere à menor necessidade de manutenção, uma vez que recebe o fluido de trabalho limpo e em temperatura não muito elevada.

O autor ainda ressalta que, quando submetida a manutenções preventivas frequentes e à manutenção preditiva, a vida útil da turbina a vapor pode ser prolongada por várias décadas. O desempenho desse equipamento, assim como o de outros sistemas industriais, está relacionado a aplicação adequada de estratégias de manutenção, as quais contribuem para a redução do desgaste dos componentes e, conseqüentemente, para o aumento da confiabilidade operacional.

## **4 METODOLOGIA**

Neste tópico serão abordados os métodos utilizados para o referente estudo de caso, e está distribuído em tópicos de Pesquisa, variáveis, local utilizado para a pesquisa, onde será descrito o sistema de cogeração do objeto de estudo analisado, e por fim, como foi feita a análise. Também serão apresentados os fundamentos termodinâmicos envolvidos no processo, a partir da busca de materiais teóricos para a realização do balanço energético no ciclo.

### **4.1 A Pesquisa**

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso que, segundo Ventura (2007), ao analisar diversas posições de autores, é considerado uma modalidade de pesquisa que visa uma investigação de um caso específico, contextualizado em tempo e lugar real possibilitando a busca de informações.

Além disso Gil (2017) destaca que um dos diferentes propósitos do estudo de caso é explorar situações da vida real, das quais os limites e fronteiras não estão claramente definidos. Com base nesta definição, o presente estudo de caso surgiu da oportunidade de avaliar a eficiência térmica do sistema de cogeração da Unidade Industrial de Cimento Apodi, a partir do comparativo de dados anteriores e posteriores às manutenções programadas para a Grande Parada do Forno.

No contexto de indústrias cimenteiras, esse tipo de parada programada é caracterizado pela paralisação total do forno rotativo, com o objetivo de realizar manutenções pontuais e de grande porte nos componentes integrados a esse equipamento. Tal evento é denominado Grande Parada (GP) do forno, em função do período necessário para a execução das intervenções, que geralmente varia entre vinte e cinco e trinta dias, abrangendo atividades de manutenções mecânicas, elétricas e de instrumentação, além de reparos estruturais.

Por tratar-se de uma intervenção que ocorre a cada oito meses, buscou-se evidenciar a partir dessa oportunidade, o impacto das manutenções realizadas nos componentes do processo, bem como sua importância para a eficiência do ciclo de cogeração analisado.

## 4.2 Variáveis

Para efetuar o cálculo da eficiência térmica, foram coletados dados dos componentes do ciclo, que foram fornecidos pela empresa. Os dados são de temperatura e pressão, necessários para a busca das propriedades termodinâmicas envolvidas em cada etapa do processo de produção de energia.

A partir desses dados, as propriedades termodinâmicas dos fluidos (água e vapor) foram adquiridas com o auxílio do software CAT Tables (*Computer-Aided Thermodynamic Tables*), contribuindo nos cálculos do Ciclo Rankine ideal realizados a partir dos estados termodinâmicos definidos para cada componente do ciclo.

Para a resolução das equações e elaboração de gráficos, foram utilizadas planilhas do *software* Microsoft Excel.

## 4.3 Local utilizado para a pesquisa

O presente estudo de caso foi aplicado ao sistema de cogeração de energia da Companhia Industrial de Cimento Apodi, Unidade de Quixeré, empresa brasileira do setor cimenteiro com forte atuação no Nordeste, conforme quantificado na Tabela 1. A Companhia destaca-se pela adoção de processos industriais modernos e pelo compromisso com o desenvolvimento sustentável.

A Unidade localizada no município de Quixeré, no estado do Ceará, conta com alternativas estratégicas tanto no fator produtivo quanto socioeconômico, ao reunir tecnologia com eficiência operacional e responsabilidade socioambiental (CIMENTO APODI, 2023).

Tabela 1 – Distribuição das Unidades da Companhia Industrial de Cimento Apodi

| DESCRIÇÃO               | TOTAL | NO NORDESTE |
|-------------------------|-------|-------------|
| Laboratórios            | 2     | 2           |
| Fábricas                | 2     | 2           |
| Unidades de Concreto    | 4     | 4           |
| Centro tecnológico      | 1     | 1           |
| Centros de Distribuição | 10    | 8           |

Fonte: elaborada pelo autor com base em Cimento Apodi (2023).

O relatório de sustentabilidade de 2023 ainda acrescenta que a empresa mantém o foco na eficiência energética, na redução de impactos ambientais e uso racional dos recursos naturais, ao investir em tecnologias que tem por objetivo otimizar o consumo energético e a redução das emissões atmosféricas, atendendo aos princípios de sustentabilidade e competitividade industrial.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2024, a Companhia industrial de Cimento Apodi apresenta impactos locais positivos através do engajamento com as comunidades do entorno, fortalecendo iniciativas sociais, como por exemplo o programa de voluntariado, onde mais de 100 colaboradores dedicam parte de seu tempo às ações sociais desse programa, fortalecendo a conexão com a comunidade.

Além disso, a Cimento Apodi avançou na adoção de tecnologias com foco na descarbonização, com destaque para investimentos em eficiência energética. Um exemplo dessas tecnologias é o sistema de Cogeração da planta, que utiliza os gases provenientes do forno para geração de energia elétrica, tendo gerado, em 2024, uma potência média de aproximadamente 3,2 MW (CIMENTO APODI, 2024).

#### **4.4 Panorama do sistema de cogeração de energia da CIA Industrial de Cimento Apodi - Unidade de Quixeré**

Neste tópico serão abordadas as características dos componentes do sistema de cogeração da Companhia industrial de Cimento Apodi, na qual é objeto deste estudo de caso. Ao final de cada subtópico, estarão representados em forma de diagrama, cada componente avaliado no estudo, nos quais foi aplicado o estudo da eficiência térmica do ciclo.

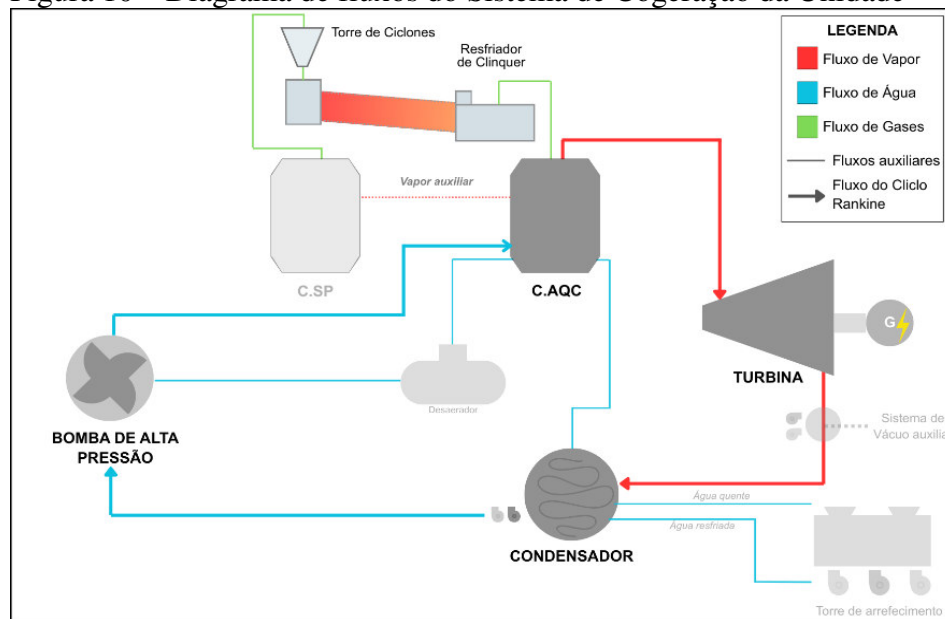
##### ***4.4.1 Síntese do Sistema***

O sistema de Cogeração da planta industrial de cimento Apodi funciona baseado no Ciclo Rankine, operando com água como fluido de trabalho. É composto por bombas, caldeiras, uma turbina (conectada a um gerador) e um condensador, que são equipamentos cruciais para o funcionamento desse Ciclo de geração de energia elétrica; além destes equipamentos, há ainda um desaerador de água, e uma torre de resfriamento. A Figura 10 apresenta o circuito de produção de energia na cogeração com os respectivos fluxos.

Em termos econômicos, esse sistema é responsável por cerca de até 30% da energia consumida na planta e cerca de 15% são utilizados para ligar bombas e os próprios equipamentos do sistema, o que garante não somente seu funcionamento, mas também uma economia em relação aos gastos com energia para os mesmos.

Segundo dados internos da empresa, a autogeração de energia resultou em uma economia de aproximadamente 15 milhões em eletricidade em 2025, além de proporcionar uma redução estimada de 16.713 toneladas de CO<sub>2</sub> desde o início de sua operação em 2015. A autogeração contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que reduz a demanda de consumo de energia elétrica advinda da rede, cuja a geração está associada à emissão desses gases.

Figura 10 – Diagrama de fluxos do Sistema de Cogeração da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.4.2 Circuito de geração de vapor e de Energia Elétrica

A geração de vapor é realizada por caldeiras, que são o ponto central de todos os sistemas de produção de vapor. O circuito de geração de vapor da Cogeração da Apodi é composto por duas caldeiras do tipo aquatubular, denominadas Caldeira AQC (*Air Quenching Cooler*) e Caldeira SP (*Suspension Preheater*).

Essas caldeiras oferecem todo o fluxo de vapor necessário para a produção de energia elétrica pela cogeração e trabalham em conjunto em regime permanente. As caldeiras são compostas por alguns compartimentos, que serão discutidos nos tópicos seguintes.

#### 4.4.2.1 Caldeira AQC (*Air Quenching Cooler*)

A Caldeira AQC gera vapor através dos gases de combustão advindos do resfriador de clínquer da planta, visto que é o fluxo de gases de maior volume e disposição de temperatura, entregando aproximadamente 410°C. Ela trabalha com uma vazão nominal de 28,4 t/h e uma pressão de vapor de 1,47MPa.

Nessa caldeira é gerado o maior fluxo de vapor para a seguinte disposição na turbina, e apresenta alguns compartimentos para uma troca de calor eficiente no equipamento. Estes compartimentos são compostos por tubos onde circula a água do processo, possibilitando a troca de calor, e estão demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição de compartimentos da Caldeira AQC

| <b>COMPARTIMENTOS DA CALDEIRA AQC</b> |
|---------------------------------------|
| HT Superheater                        |
| Water Spraying Desuperheater          |
| LT Superheater                        |
| Evaporator 1 e 2                      |
| AQC Economizer                        |
| Commonage Economizer                  |
| Hot Water Part Economizer             |

Fonte: elaborada pelo autor.

Na base da caldeira, o compartimento “*Hot Water Part Economizer*” recebe a água do condensador (vapor excedente transformado em líquido saturado) através das bombas de condensado. Este compartimento vai transferir calor à água para retirar parte do oxigênio que, em seguida, é transportada para o desaerador antes de ir para a bomba de alta pressão. A bomba de alta pressão é a bomba principal que compõe o Ciclo Rankine.

Da bomba de alta pressão, considera-se o início do ciclo Rankine, pois o líquido vai para a caldeira já na zona “AQC *Economizer*”, e dessa zona, para o tubulão, que é um componente externo às caldeiras, geralmente na parte superior. Este, é um componente indispensável para a segurança e eficiência do equipamento, utilizado como reservatório de água e vapor separando ambos os fluidos saturados.

O tubulão garante o nível de água das caldeiras através da conexão de válvulas de segurança e instrumentos como visores de nível por exemplo, contendo também tubos de ligação com a zona de superaquecimento do vapor (“LT *Superheater*”).

A zona “*Water Spraying desuperheater*” recebe o vapor gerado na caldeira SP, para compor o vapor total do sistema juntamente com o gerado na caldeira AQC. Após isso, o vapor está pronto para a seguinte disposição na turbina, através da zona “HT *Superheater*”. A Figura 11 representa a Caldeira AQC da Planta Industrial de Cimento Apodi.

Figura 11 – Caldeira AQC (*Air Quenching Cooler*) da Unidade



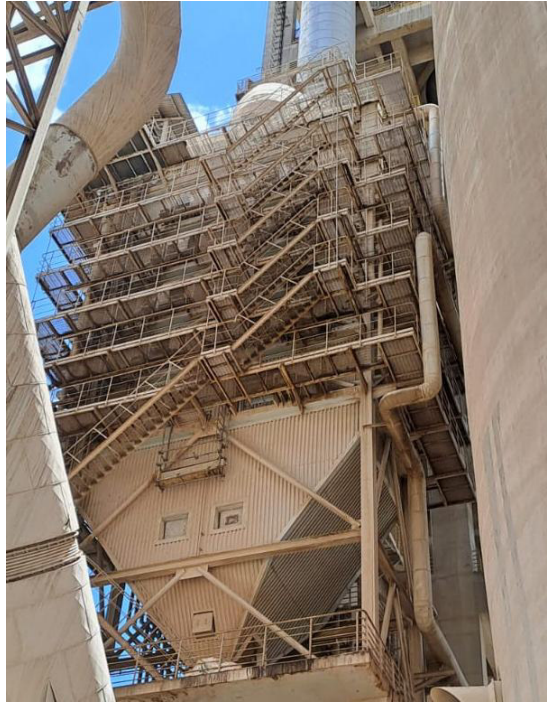
Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.4.2.2 Caldeira SP (*Suspension Preheater*)

A caldeira SP da Unidade recebe os gases advindos da torre de ciclones, com temperatura dos gases chegando a 310°C, apresentando baixa temperatura em relação aos gases do resfriador de clínquer (gases da caldeira AQC), em vista disso a caldeira SP é considerada um sistema de vapor auxiliar para a caldeira AQC, pois menor é a pressão do sistema e,

consequentemente, menor é o volume de vapor a ser entregue a turbina. A Figura 12 representa a caldeira SP da unidade, localizada próxima à torre de ciclones.

Figura 12 – Caldeira SP (*Suspension Preheater*) da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

Ainda assim, a caldeira SP pode seguir com a produção de energia em caso de interrupção do funcionamento da caldeira AQC, porém com uma produção moderada, gerando cerca de 1 a 1,5 MW de potência. Diferente da caldeira AQC, a caldeira SP contém três evaporizadores, um economizador e um superaquecedor, representados na Tabela 3. E os parâmetros normais de operação contam com uma vazão nominal de projeto de 12,2 t/h e pressão de vapor de 1,57 MPa.

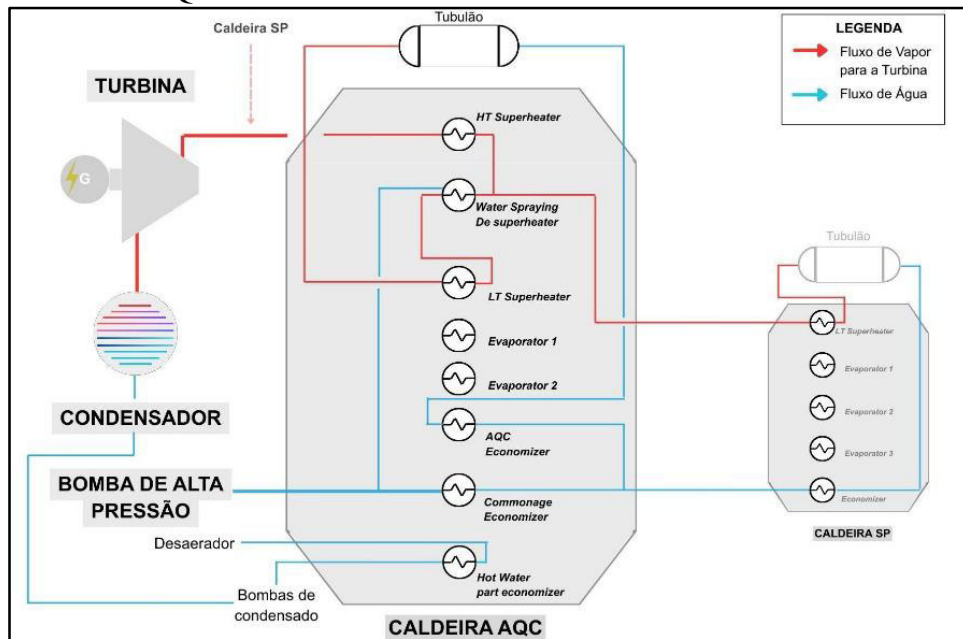
Tabela 3 – Distribuição de compartimentos da Caldeira SP

| <b>COMPARTIMENTOS DA CALDEIRA AQC</b> |
|---------------------------------------|
| LT Superheater                        |
| Evaporator 1, 2 e 3                   |
| Economizer                            |

Fonte: elaborada pelo autor

Isso é possível devido às válvulas de ligação entre os sistemas, que são monitoradas através do painel da sala de comando da Cogeração. A Figura 13 representa o circuito de geração de vapor em ambas as caldeiras da planta.

Figura 13 – Diagrama esquemático do Circuito de geração de vapor das Caldeiras AQC e SP



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.4.3 Turbina e gerador elétrico: Geração de energia Elétrica

O sistema de geração de energia conta com uma Turbina a vapor, conectada a um gerador, com capacidade de produção de 5,5 MW de potência nominal. O vapor proveniente das caldeiras é direcionado para a turbina, onde a energia térmica (composta por pressão e temperatura) é convertida em energia mecânica por meio da rotação das pás.

Essa rotação aciona o gerador acoplado ao eixo e transforma essa energia mecânica em energia elétrica. A turbina da planta é uma turbina a vapor de condensação, e apresenta uma pressão absoluta de vapor de entrada de aproximadamente 1,35 MPa, variando entre 1,15 e 1,55 MPa; e uma temperatura de vapor de cerca de 370°C (com tolerância para +15/-15°C).

O gerador elétrico do sistema contém uma potência nominal de 6000 kW, e uma eficiência de projeto de 96,4%, e está representada juntamente a turbina na Figura 14.

Figura 14 – Turbina a vapor e Gerador de energia da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

#### ***4.4.4 Condensador, água de recirculação e sistema de bombeamento***

Após geração de energia pelo turbogerador (turbina e gerador), outros processos ocorrem para a continuação do ciclo. Esses processos são a condensação do vapor, excedente da turbina, pelo condensador; e o bombeamento da água de recirculação para o sistema e o tratamento dessa água em processos de desgaseificação e desmineralização.

##### ***4.4.4.1 Condensação do vapor***

A condensação do vapor de água já passado pela turbina, ocorre no condensador (Figura 15). Durante esse processo, há uma criação de vácuo parcial que ajuda a reduzir a pressão de exaustão da turbina, para que a mesma opere com maior eficiência. Em vista disso, o sistema de condensação da cogeração da planta conta com uma bomba de vácuo auxiliar, contribuindo com essa redução da pressão.

O condensador do sistema comporta um volume de água de resfriamento de aproximadamente 3400 t/h, á uma pressão máxima de 0,4 MPa e um parâmetro de entrada da água de resfriamento de aproximadamente 27°C.

Figura 15 – Condensador de vapor da Unidade

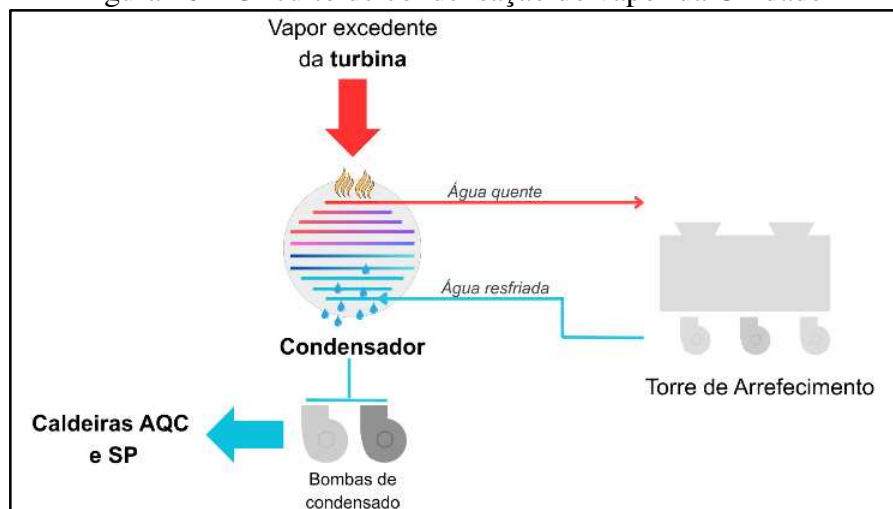


Fonte: Autoria própria (2025)

O resfriamento do vapor ocorre através da troca de calor com os tubos de água de resfriamento, e à medida que o vapor perde calor, a temperatura diminui até o ponto de condensação, transformando o vapor em água no estado líquido novamente para seguir com o ciclo.

A água dos tubos de troca de calor do condensador é transportada para a torre de resfriamento e é arrefecida para reutilização nesse processo. A Figura 16 apresenta o circuito Condensador e a torre de arrefecimento.

Figura 16 – Circuito de condensação do vapor da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.4.4.2 Água de recirculação do sistema

Antes da água do processo circular no sistema, são necessários alguns tratamentos para manter a qualidade da mesma, pois irá ser transportada por bombas de recirculação (Figura 17) e, em seguida, seguir para as caldeiras. Há duas bombas de recirculação, operante apenas uma delas, enquanto a outra está em *standby*.

Figura 17 – Bombas de alta pressão do sistema



Fonte: Autoria própria (2025)

Esses tratamentos são necessários para evitar a deterioração dos elementos desses componentes. Em vista disso, a planta dispõe de recursos de desmineralização e degaseificação da água do sistema.

#### 4.4.4.3 Desaerador de água de alimentação das caldeiras

O Desaerador da planta (Figura 18) recebe a água pré-aquecida na zona “*Hot Water Part Economizer*” da caldeira AQC, antes de ser recirculada para continuar o ciclo de geração de energia. Ele retira os gases, como gás oxigênio e dióxido de carbono, presentes na água de alimentação das caldeiras que é transportada pela bomba de alta pressão do ciclo. Essa desaeração é crucial para garantir a eficiência e integridade dos equipamentos ao prevenir problemas como a corrosão.

Figura 18 – Desaerador de água da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

O desaerador também recebe água tratada do tanque de desmineralização (Figura 19), cujo a água tratada neste é advinda dos poços de água bruta, após passar por osmose e seguir com a retirada de impurezas. Este processo é importante para garantir a qualidade e a pureza da água que será disposta a caldeira, garantindo a integridade dos tubos e a segurança do equipamento.

Figura 19 – Tanque de desmineralização da Unidade



Fonte: Autoria própria (2025)

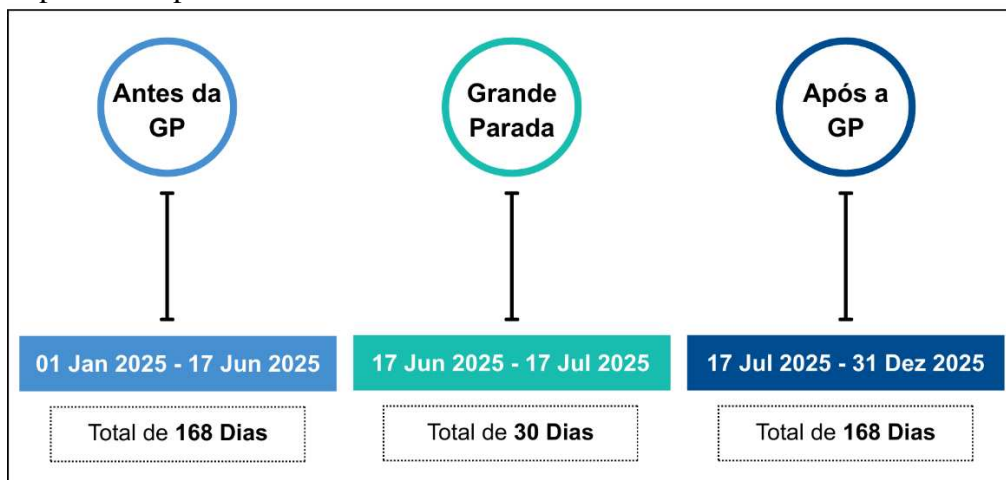
#### 4.5 Análise

As análises dos resultados foram feitas a partir dos cálculos de eficiência térmica baseadas no ciclo Rankine Ideal, aplicado ao sistema de cogeração de energia da Companhia Industrial de Cimento Apodi, Unidade de Quixeré, com dados reais de potência gerada pela cogeração da Apodi durante o ano.

A decisão de analisar o ciclo ideal surgiu devido à indisponibilidade de alguns dados operacionais completos e mais precisos. Portanto, foram assumidos processos isentrópicos para a compressão na bomba e a expansão na turbina, conforme os materiais de estudos termodinâmicos, neste caso, referenciados em Çengel 2013.

Para a definição dos estados termodinâmicos das substâncias nos componentes, foi selecionado o dia que gerou uma maior potência de energia útil a empresa, de um banco de dados gerados diariamente (intervalos de 24 horas), antes e após as manutenções realizadas durante a Grande Parada do forno. A Figura 20 apresenta os dias da Grande Parada.

Figura 20 – Delimitação temporal de tempo da Grande Parada (GP) e períodos operacionais durante ano de 2025



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao identificar a maior potência gerada, e seus parâmetros operacionais, foi realizado um balanço de energia nos componentes baseados nas equações de eficiência térmica, para obter o ganho relativo na performance da Cogeração de Energia, da qual impactou os Indicadores Chave de Performance de manutenção.

#### 4.6 Modelagem Termodinâmica do Ciclo

De acordo com Çengel e Boles (2013) “Os componentes de uma usina de potência a vapor (turbinas, compressores, trocadores de calor e bombas), por exemplo, operam ininterruptamente durante meses até que o sistema seja paralisado para manutenção, e a partir disso, o Ciclo de Rankine Ideal define os estados termodinâmicos do sistema considerando que ambos os quatro componentes operam em regime permanente, o que simplifica a análise dos processos termodinâmicos envolvidos.

A partir disso, é possível obter a equação de energia para um dispositivo operando com escoamento em regime permanente, reduzindo-a para equação (1). A mesma é expressa reduzida pois as energias cinética e potencial são desprezadas no cálculo, devido as suas variações serem relativamente pequenas em termos de trabalho e transferência de calor envolvidos no processo.

$$(q_{ent} - q_{sai}) + (w_{ent} - w_{sai}) = h_{sai} - h_{ent} \quad (1)$$

Onde:  $q_{ent}$  é a energia fornecida ao sistema na forma de calor, como a fornecida pela caldeira ao vapor;  $q_{sai}$  corresponde a energia térmica rejeitada pelo sistema, o que ocorre no condensador;  $w_{ent}$  e  $w_{sai}$  são, respectivamente, o trabalho consumido pelo sistema e produzido pelo mesmo, e por fim,  $h_{ent}$  e  $h_{sai}$  são as entalpias específicas do fluido na entrada e na saída do equipamento.

Em sequência, são apresentadas as equações de conservação da energia aplicadas a cada dispositivo que compõe o ciclo de Rankine ideal. No caso da bomba, esta é considerada um dispositivo isentrópico e adiabático. Assim, para a bomba, tem-se:

$$w_{bomba.ent} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

Onde  $w_{bomba.ent}$  é o trabalho realizado pela bomba para comprimir e bombear o fluido,  $h_1$  é a entalpia de entrada na bomba e  $h_2$  é a entalpia de saída da bomba, que corresponde com a entrada da caldeira.

Para as caldeiras, realiza-se um balanço de energia considerando ambas as caldeiras AQC (*Air Quenching Cooler*) e SP (*Suspension Preheater*) como um único dispositivo. Para essa análise, admite-se a transferência de calor a pressão constante, e trabalho nulo. A partir dessas hipóteses, obtêm-se a quantidade de calor disponibilizada ao sistema, a partir da diferença entre as entalpia  $h_3$  (entalpia do fluido que sai da caldeira e entra na turbina) e  $h_2$ .

$$q_{ent} = h_3 - h_2 \quad (3)$$

A turbina também será considerada, assim como a bomba, um dispositivo isentrópico e adiabático. O trabalho realizado por ela para expandir o vapor é expresso por:

$$w_{turbina.sai} = h_3 - h_4 \quad (4)$$

Onde  $h_4$  é a entalpia do fluido na entrada do condensador.

Por fim, no condensador, o processo ocorre à pressão constante, pois desconsidera-se as possíveis perdas de pressão causadas pelo atrito durante o escoamento do fluido pelas paredes das tubulações. Assim, o balanço de energia para o condensador é obtido por:

$$q_{sai} = h_4 - h_1 \quad (5)$$

Segundo Mogawer (2005), a eficiência térmica é um parâmetro que indica o percentual da energia fornecida ao fluido de trabalho através da caldeira, na qual é convertida em trabalho líquido, obtendo assim, a equação de eficiência térmica do Ciclo de Rankine:

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_{ent}} = 1 - \frac{q_{sai}}{q_{ent}} \quad (6)$$

Onde o trabalho líquido do ciclo ( $w_{liq}$ ) é obtido a partir da diferença entre o trabalho gerado pela turbina e o trabalho utilizado pela bomba, conforme expresso por:

$$w_{liq} = w_{turbina.sai} - w_{bomba.ent} \quad (7)$$

## 5 RESULTADOS

O dia que foi selecionado para os cálculos, foi o dia em que foi produzida uma maior potência de energia útil a empresa, de um banco de dados gerados diariamente (intervalos de 24 horas), antes e após a parada do forno (Grande Parada do forno iniciou-se dia 17 de junho e foi até 17 de julho) e os dados estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Potência elétrica gerada nos períodos anterior e posterior a GP

| PERÍODO                | DATA                | POTÊNCIA GERADA |
|------------------------|---------------------|-----------------|
| Antes da Grande Parada | 17 de maio 2025     | 3,7 MW          |
| Após a Grande Parada   | 29 de setembro 2025 | 3,9 MW          |

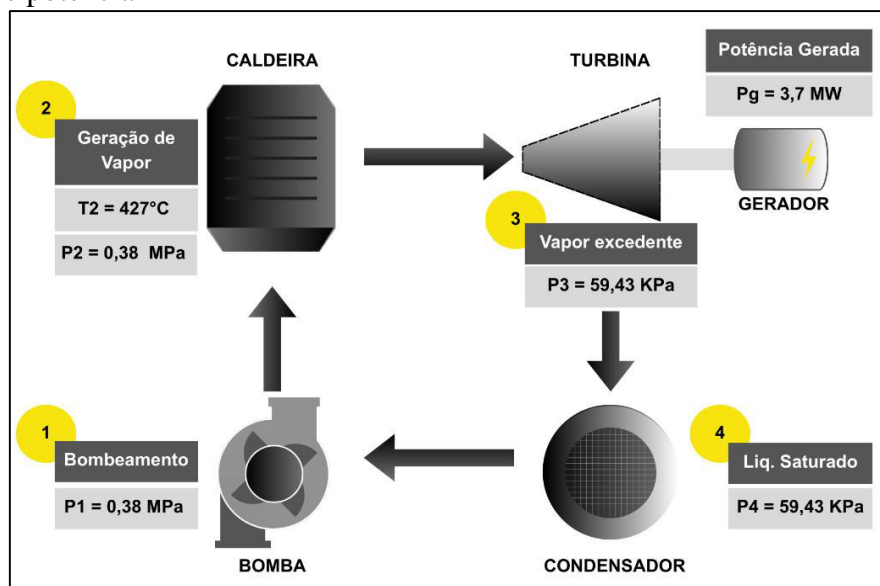
Fonte: elaborada pelo autor.

A partir disso, foi realizado o cálculo da eficiência térmica do sistema, onde para cada potência, foram coletados os dados de pressão e temperatura em cada equipamento envolvido no ciclo, nos pontos de entrada e saída dos fluidos.

### 5.1 Eficiência Térmica do sistema antes das manutenções previstas

Antes das manutenções planejadas, a maior potência gerada foi de 3,7 MW, com os seguintes parâmetros levantados, a partir do banco de dados da empresa, dispostos na Figura 21.

Figura 21 – Parâmetros de operação de produção de energia com geração de 3,7 MW de potência



Fonte: Autoria própria (2025)

De acordo com CENGEL (2013), a segunda lei da termodinâmica estabelece que nenhuma máquina térmica pode ter uma eficiência de 100%, devido às irreversibilidades dos processos reais, envolvendo perdas como o atrito entre as tubulações, a dissipação de energia para o meio externo e as trocas térmicas com diferenças de temperatura.

Na mesma literatura, os processos reais são considerados irreversíveis, e a adoção da análise de ciclos ideais, como o ciclo Rankine ideal, permite uma estipulação de eficiência de um processo, servindo como base para avaliação e comparação do desempenho dos sistemas térmicos.

Mediante a esse conceito, após realização dos cálculos termodinâmicos a partir das equações trabalhadas anteriormente, foi obtido uma eficiência térmica do ciclo, nas condições dispostas, de aproximadamente 16%.

## **5.2 Eficiência térmica do sistema após manutenções realizadas**

As manutenções de maiores custos e períodos programadas na cogeração, só podem ser realizadas em Grande Parada do forno, pois é a maior parada do ano, durando cerca de 30 dias. Nela, são executadas intervenções de grande porte, nas quais não são possíveis realizar em manutenções preventivas.

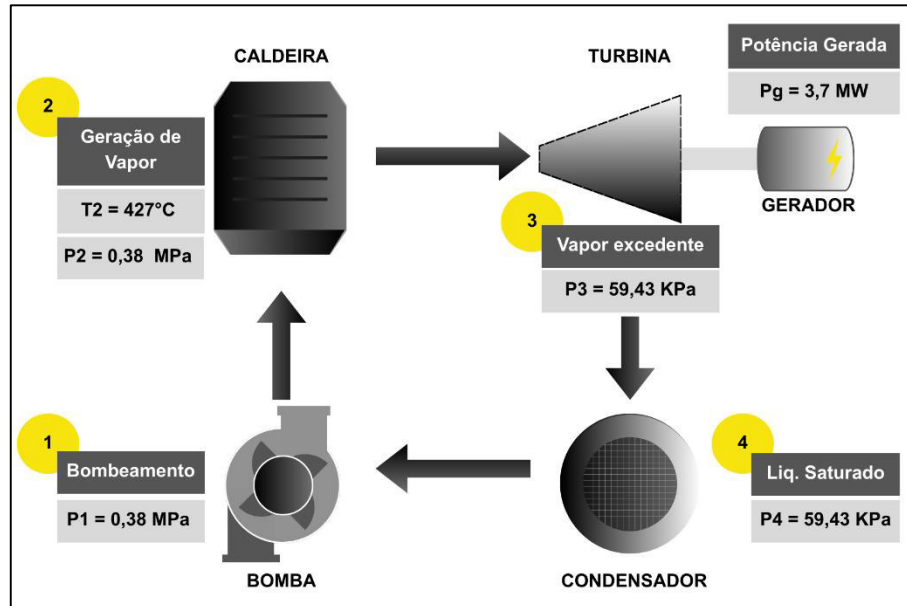
Essa estratégia é definida pois, como o combustível principal da cogeração são os gases excedentes do forno, quando o forno para em prol de sua manutenção, configura-se como uma janela de oportunidade para uma intervenção no sistema WHRS (*Waste Heat Recovery System*) da unidade.

Das manutenções planejadas para a cogeração, foram realizadas intervenções em todos os componentes do circuito onde, nas caldeiras, foram executadas limpezas e inspeções nos dutos de entrada e saída das mesmas; além disso, também houve a calibração de seus instrumentos (transmissores de temperaturas, pressão, nível etc), troca de tubulações de dreno, e a inspeção de acordo com a Norma NR13.

Em relação às bombas, foi realizada a manutenção do motor da bomba de alimentação de água das caldeiras, além da troca da mesma. Já na turbina, foram feitas as trocas das vedações e reparos externos. No condensador, foi feita a limpeza e desobstrução dos tubos internos, por limpeza química.

Com as manutenções realizadas na Cogeração, foi obtido uma maior eficiência térmica do ciclo, pois foi gerada no dia 29/09/2025 uma potência de 3,9 MW, com os dados conforme a Figura 22, e obteve-se uma eficiência térmica de 17%.

Figura 22 – Parâmetros de operação de produção de energia com geração de 3,9 MW de potência



Fonte: Autoria própria (2025)

### 5.3 Estudo de caso: Comparativo de Eficiências

Após a realização do cálculo das eficiências térmicas baseadas no ciclo de Rankine ideal para as duas condições operacionais: antes e após as manutenções, realizadas no sistema, obteve-se as eficiências de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 – Eficiência térmica do ciclo de Rankine ideal x Potência gerada

| DATA                | POTÊNCIA GERADA | EFICIÊNCIA TÉRMICA |
|---------------------|-----------------|--------------------|
| 17 de maio 2025     | 3,7 MW          | 16%                |
| 29 de setembro 2025 | 3,9 MW          | 17%                |

Fonte: elaborada pelo autor.

Observou-se um aumento de aproximadamente 1 ponto percentual na eficiência térmica do ciclo, com o aumento de 0,2 MW, indicando uma melhoria no aproveitamento da energia térmica utilizada para produção de vapor na caldeira, além da conversão dessa energia

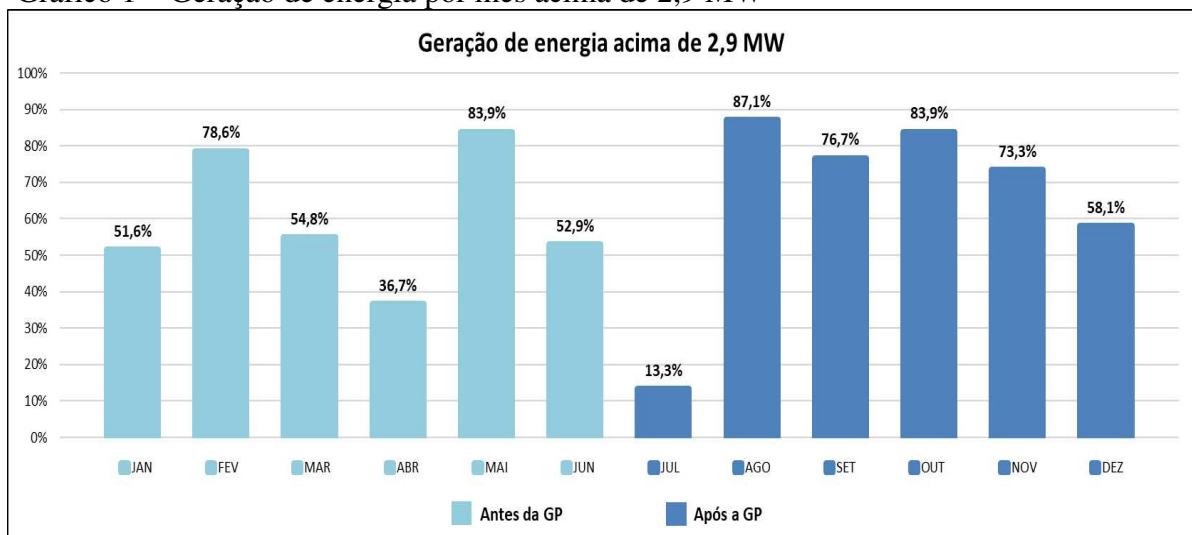
em trabalho mecânico na turbina, refletindo a melhoria das condições operacionais dos equipamentos componentes do sistema de cogeração.

Esse ganho na eficiência mostra-se tecnicamente relevante, uma vez que os sistemas de cogeração operam de forma contínua, durante 24 horas por dia, acumulando ganhos energéticos ao longo do tempo e contribuindo para uma economia anual significativa. Como consequência, observa-se uma redução do consumo de energia elétrica da rede com a redução de demanda de energia.

Ademais, mesmo com as condições adotadas para avaliação do ciclo ideal, como a desconsideração das perdas reais entre os processos, a variação observada no cenário descrito se dá pela mudança dos parâmetros termodinâmicos de operação, como pressão e temperatura do vapor, que foram impactados pelas intervenções realizadas no sistema.

Além dos resultados de eficiência térmica apurados entre os dois cenários de gerações de potência, também são analisadas as produções mensais de energia antes e após as manutenções realizadas durante o ano de 2025. O Gráfico 1 representa, mensalmente, a porcentagem de dias em que a geração de potência foi acima de 2,9 MW. Esse valor foi adotado como referência, pois é um valor médio de produção considerado um indicador base do desempenho da produção de energia pela cogeração.

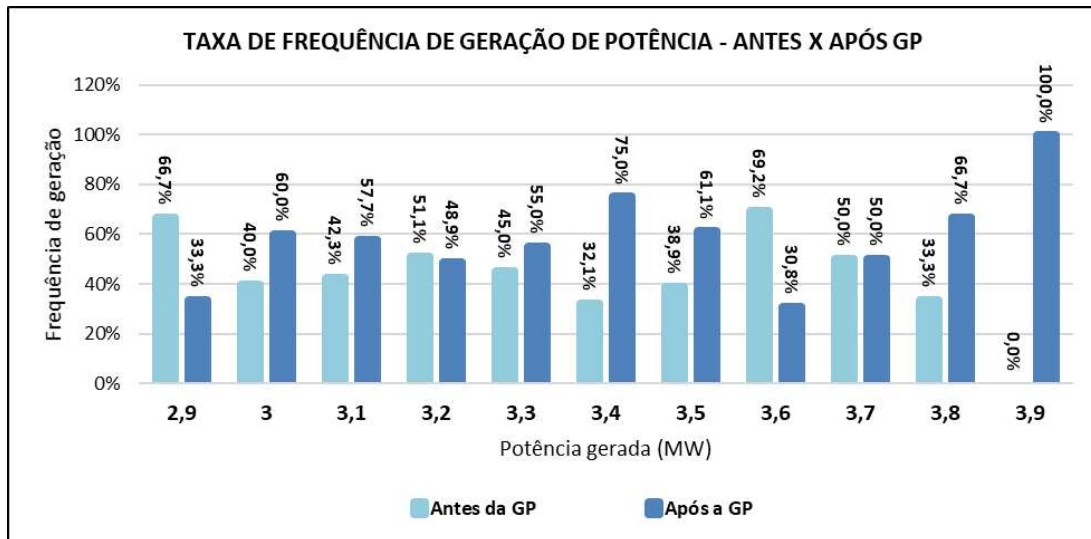
Gráfico 1 – Geração de energia por mês acima de 2,9 MW



Fonte: Autoria própria (2025)

Expandindo esses números, obtendo a frequência de geração de potências entre 2,9 MW e 3,9 MW, pode-se notar através do Gráfico 2, que as maiores potências foram geradas com maior frequência após a Grande Parada. Destacando a maior geração (3,9 MW) após a GP.

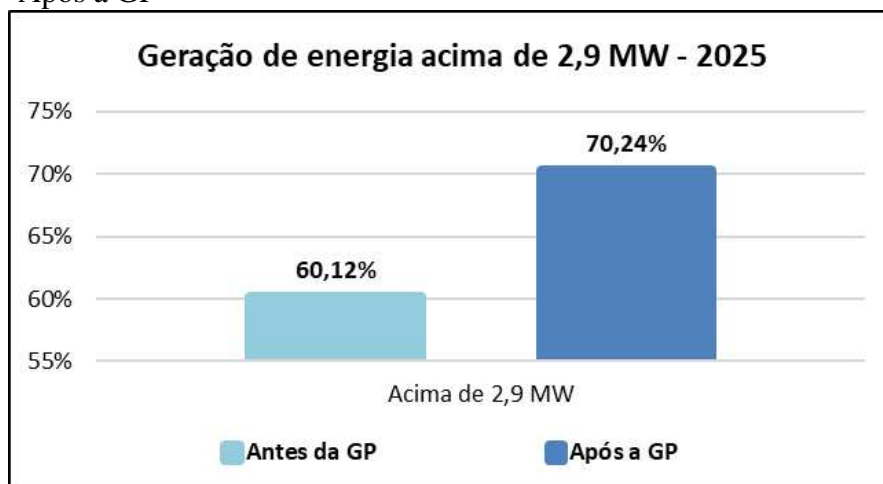
Gráfico 2 – Frequência de geração de energia entre 2,9 MW e 3,9 MW – Antes e após a GP



Fonte: Autoria própria (2025)

No primeiro semestre, antes da parada (totalizando 168 dias), houve a geração acima de 2,9 MW em 101 dias, enquanto após a Grande Parada (segundo semestre), totalizando também 168 dias, houve a geração acima de 2,9 MW em 118 dias, demonstrando que a geração de maiores potências pela cogeração, ocorreu após as manutenções realizadas. O Gráfico 3 representa esses resultados.

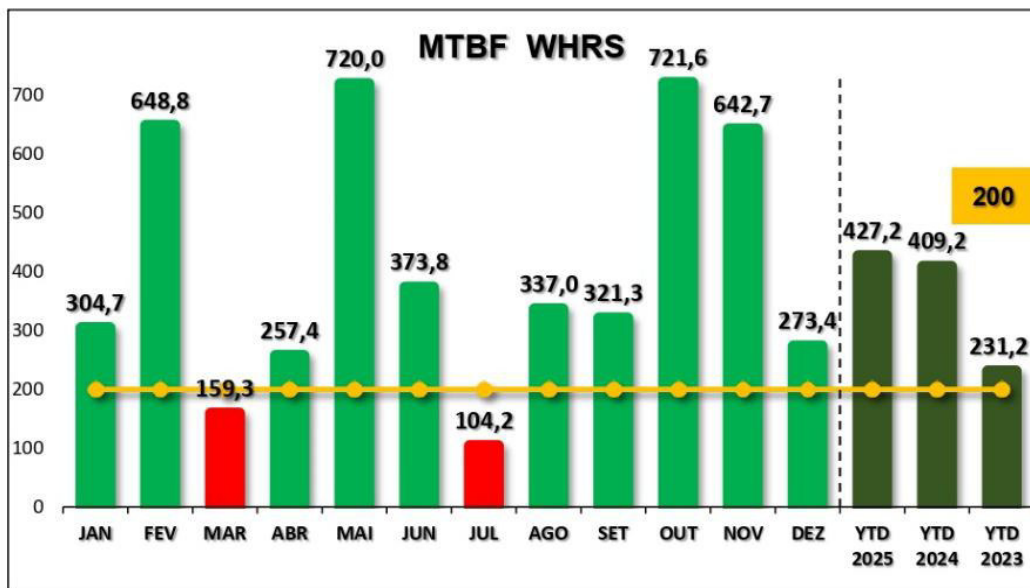
Gráfico 3 – Geração acima de 2,9 MW de potência – Antes da GP X Após a GP



Fonte: Autoria própria (2025)

Esses resultados impactam diretamente nos Indicadores Chave de Performance, do inglês *Key Performance Indicator* (KPI), especialmente no MTBF (*Mean Time Between Failures*). Após a realização das manutenções nos equipamentos do sistema de cogeração, houve uma redução do número de paradas não programadas, alavancando o MTBF anual (Gráfico 4).

Gráfico 4 – MTBF acumulado anual do sistema de Cogeração da Unidade



Fonte: Companhia Industrial de Cimento Apodi – Indicadores internos de performance da Cogeração (2025).

Esse indicador representa o tempo médio entre falhas e é amplamente utilizado para analisar a confiabilidade e a performance operacional dos equipamentos. Seu controle é feito a partir do cálculo da razão entre o tempo total de operação e número de paradas registradas.

Este resultado tem forte impacto sobre a produção de clínquer no forno, uma vez que, de acordo com dados internos da empresa, quando o sistema de cogeração é interrompido, faz-se necessária a redução da produção do forno para a segurança operacional, obtendo uma perda de aproximadamente 10 t/h de produção de clínquer.

Portanto, o aumento do MTBF evidencia a efetividade das intervenções realizadas durante a GP, impactando positivamente as condições de operação do sistema de cogeração. Como consequência, há a diminuição do número de paradas, e consequentemente a redução das perdas de produção de clínquer no forno.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo de caso teve como objetivo analisar o desempenho do sistema de cogeração de energia de uma indústria cimenteira, tendo como objeto de estudo a Companhia Industrial de Cimento Apodi – Unidade de Quixeré, a qual é referência no uso da tecnologia de recuperação de calor residual na geração de energia elétrica no setor cimenteiro.

O estudo também permitiu a descrição e o entendimento do funcionamento do sistema de cogeração, assim como a identificação dos equipamentos que o compõem, possibilitando o desenvolvimento da pesquisa e a apuração dos resultados a partir do reconhecimento do ciclo Rankine no circuito.

A análise foi realizada a partir da modelagem termodinâmica de um ciclo Rankine ideal, utilizando dados operacionais reais de temperatura, pressão e potência gerada, angariados em períodos distintos antes e após as manutenções programadas para realização durante a Grande Parada do forno, possibilitando uma avaliação comparativa do impacto das intervenções na performance energética do sistema.

A partir dessa análise, foram obtidos resultados indicativos de melhoria no desempenho do sistema após a execução das manutenções, nos quais são evidenciados pelo aumento da potência máxima gerada, de 3,7 MW antes das intervenções para 3,9 MW após as intervenções, bem como pelo ganho de um ponto percentual da eficiência térmica.

Esses resultados refletem um melhor aproveitamento da energia térmica residual advinda do processo produtivo de cimento, demonstrando a influência das condições operacionais dos equipamentos no rendimento global do sistema de cogeração.

Nesse contexto, os resultados obtidos reforçam a importância e o impacto das manutenções industriais na obtenção de uma melhor eficiência energética e confiabilidade operacional do sistema. Intervenções como limpeza de superfícies dos equipamentos do ciclo, reparos na turbina, desobstrução do condensador e manutenções nas bombas, acarretam ganhos energéticos ao longo do tempo, além de contribuírem para o aumento da vida útil dos componentes do sistema.

Por fim, a realização deste estudo foi potencializada pela vivência prática proporcionada pela oportunidade de estágio em ambiente industrial, que possibilitou a consolidação dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação em Engenharia Mecânica, e a aplicação desses conhecimentos em um sistema real de geração de energia. Tal experiência contribuiu significativamente para o desenvolvimento técnico e profissional ao

interligar a compreensão sobre eficiência energética, manutenção industrial e sustentabilidade no setor cimenteiro.

### **6.1 Sugestões de trabalhos futuros**

Com os objetivos propostos atingidos, o tema trabalhado contém uma potencial abordagem futura em aspectos de pesquisa, levando em consideração a complexidade dos sistemas de cogeração e a relevância da eficiência energética no contexto industrial.

Como sugestão para posteriores trabalhos, estudos baseados no ciclo Rankine real, incorporando as irreversibilidades dos processos, como perdas térmicas por atrito nas tubulações, para o meio externo, eficiências isentrópicas reais da turbina e da bomba, associando-as às perdas mecânicas e elétricas do turbogerador. Essa pesquisa permitiria uma avaliação mais precisa do desempenho real do sistema através da comparação entre ambos cenários.

Sugere-se ainda um aprofundamento termoeconômico, integrando os ganhos energéticos observados em análise de custos de manutenção, investimento e retorno financeiro, permitindo quantificar economicamente os retornos obtidos a médio e longo prazo com a aplicação de intervenções assertivas. Essa quantificação permitiria subsidiar as decisões estratégicas da gestão da manutenção e de investimentos futuros no sistema de cogeração.

Por fim, recomenda-se também a realização de estudos sobre alternativas tecnológicas para o aumento da eficiência do ciclo, como a otimização do superaquecimento do vapor e melhorias no sistema de condensação. Em relação a turbina, sugere-se a realização de uma análise aerodinâmica do canal termodinâmico, a fim de subsidiar decisões técnicas como, por exemplo, a reforma de seu palhetamento, visando o aprimoramento do aproveitamento de calor residual e à elevação do rendimento do sistema.

Em meio a essas hipóteses, sugere-se ainda um possível dimensionamento das tubulações de fluxos de água e vapor para simulação dos ganhos e/ou perdas térmicas e de pressão nas linhas de ligação entre os componentes do ciclo.

## REFERÊNCIAS

AECIPP. **Cimento Apodi usa tecnologia para capturar gases do efeito estufa gerados nos fornos.** Disponível em: <https://aecipp.com.br/pt-br/noticias/cimento-apodi-usa-tecnologia-para-capturar-gases-do-efeito-estufa-gerados-nos-fornos> . Acesso em: 03 jan. 2026.

ANDREOS, Ronaldo. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CIMENTO PORTLAND – AECIPP. **Cimento Apodi mostra que o futuro da indústria de baixo carbono também nasce no Nordeste.** Disponível em: <https://www.aecipp.com.br/pt-br/noticias/cimento-apodi-mostra-que-o-futuro-da-industria-de-baixo-carbono-tambem-nasce-no-nordeste>. Acesso em: 4 dez. 2025.

BARBELI, Marcelo Carlos. **A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.** Empreendedorismo, Gestão e Negócios, v. 4, n. 4, p. 238-246, 2015.

BEZERRA, Francisco Tales Sousa. **Eficiência energética e riscos ambientais em uma fábrica de cimento.** 2011.

BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, [s.d.]. Cap. 4 – Geradores de vapor.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica.** Coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. Série Van Wylen. 8ª ed. norte-americana. São Paulo: Blucher, 2013.

BRASIL, Newton Paterman. **Cogeração: turbinas a vapor. Apostila da disciplina de Engenharia de Equipamentos.** Edição de agosto de 2005.

CIMENTO APODI. **Relatório de Sustentabilidade 2023.** Disponível em: <https://www.cimentoapodi.com.br>. Acesso em: 26 jan. 2026.

CIMENTO APODI. **Relatório de Sustentabilidade 2024.** Disponível em: <https://www.cimentoapodi.com.br>. Acesso em: 26 jan. 2026.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica.** Tradução de Paulo Maurício Costa Gomes. Revisão técnica de Antonio Pertence Júnior. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DE CAMPOS, Daniel Vigarinho. **COGERAÇÃO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO.**

DE MELLO, Liodoro. **O potencial da cogeração de energia no Brasil, sob a ótica do sistema de informação geográfica (sig ou gis).** Revista Brasileira de Energia Solar, v. 10, n. 2, p. 98-103, 2019.

ENEL. **Cogeração – a dupla função da energia**. Enel Learning Hub. [s.d.]. Disponível em: <https://www.enel.com/pt/learning-hub/transicao-energetica/cogeracao>. Acesso em: 25 nov. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

IEEPL. **Waste Heat Recovery System (WHRS)**. Disponível em: <https://ieepl.com/whrs/>. Acesso em: 4 dez. 2025

LEITE, Nathalia Cristina Gonçalves. **Análise da eficiência elétrica de cogeração de uma plataforma de petróleo e proposta alternativa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

MARTINELLI, L. **Geradores de vapor**. UNIJUÍ, Panambi RS, 2003.

MOGAWER, Tamer. **Análise técnica e econômica para seleção de sistemas de cogeração em ciclo combinado**. 2005.

PANOSSO, Giancarlo Cerutti. **Métodos de simulação para ciclos de Rankine**. 2003.

PERA, Hildo. **Geradores de vapor**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

SANTOS, Fernando Butierres dos; NOVO, Luciana Morgani Alves. **Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da Central Cogeração Infoglobo**. 2008.

SHAPIRO, Howard N.; MORAN, Michael J.; BOETTNER, David D. **Fundamentos da engenharia termodinâmica**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SILVEIRA, José Luz. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário**. 1994. Tese de Doutorado. [sn].

TOGAWA ENGENHARIA. **Os principais tipos de caldeiras**. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 12 jan. 2026.

TURBIVAP. **Turbina a vapor de condensação**. Disponível em: <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-condensacao/>. Acesso em: 12 jan. 2026. (s.d.)

VENTURA, Magda Maria. **O estudo de caso como modalidade de pesquisa**. Revista SoCERJ, v. 20, n. 5, p. 383-386, 2007.

ULIANI, Murilo Henrique. **Análise energética de um sistema de cogeração aplicado a indústria cafeeira utilizando a casca do café como combustível**. 2017.