

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ - FAACZ

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

GERMANO NOGUEIRA DIAS NETO

LUDIMILLA PESSOTTI MARASTONI LECCO

RAILANDER BORGES DA SILVA

RENZO CORDEIRO TOLENTINO

YAN CHRISTIAN SANTOS LIRIO

RECUPERAÇÃO FUNCIONAL E DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA DE
BANCADA DIDÁTICA DE CICLO RANKINE: ANÁLISE
TERMODINÂMICA E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Aracruz – ES

2025

GERMANO NOGUEIRA DIAS NETO
LUDIMILLA PESSOTTI MARASTONI LECCO
RAILANDER BORGES DA SILVA
RENZO CORDEIRO TOLENTINO
YAN CHRISTIAN SANTOS LIRIO

**RECUPERAÇÃO FUNCIONAL E DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA DE
BANCADA DIDÁTICA DE CICLO RANKINE: ANÁLISE
TERMODINÂMICA E DIAGNÓSTICO DE FALHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado á
Faculdades Integradas de Aracruz (FAACZ), como
parte das exigências para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica

Professor(a): Gabriel Giampietro de Andrade

Aracruz – ES

2025

GERMANO NOGUEIRA DIAS NETO
LUDIMILLA PESSOTTI MARASTONI LECCO
RAILANDER BORGES DA SILVA
RENZO CORDEIRO TOLENTINO
YAN CHRISTIAN SANTOS LIRIO

**RECUPERAÇÃO FUNCIONAL E DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA DE
BANCADA DIDÁTICA DE CICLO RANKINE: ANÁLISE
TERMODINÂMICA E DIAGNÓSTICO DE FALHAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado á
Faculdades Integradas de Aracruz (FAACZ), como
parte das exigências para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica

COMISSÃO EXAMINADORA

Membro da Banca

Membro da Banca

Membro da Banca

Aracruz, ____ de ____ de 2025.

Agrademos a Deus, nossos familiares e amigos pelo apoio e incentivo ao longo dessa jornada.

RESUMO

O presente trabalho propõe a documentação, a engenharia reversa e o desenvolvimento de um guia técnico de manutenção para uma bancada didática de Ciclo Rankine, originalmente construída em 2014 e submetida a um processo de diagnóstico e recuperação. O diagnóstico inicial revelou a ausência da turbina e o travamento de componentes rotativos, como a bomba de alimentação. Diante da ausência da documentação das modificações precedentes, o escopo deste trabalho evoluiu para a entrega de um "Build Report" detalhado e um manual de manutenção individualizada. O objetivo é perpetuar o ativo didático, permitindo o estudo isolado de subsistemas (troca térmica, instrumentação e bombeamento) e garantindo a segurança operacional futura, consolidando-se como uma referência técnica para a continuidade das atividades acadêmicas.

Palavras-chave: Ciclo Rankine, Bancada didática, Termodinâmica, Eficiência térmica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVO GERAL	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 INTRODUÇÃO AOS CICLOS TERMODINÂMICOS	11
3.2 AS LEIS DA TERMODINÂMICA	11
3.3 A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....	11
3.4 A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.....	12
3.5 TERCEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....	12
3.6. TERMODINÂMICA DOS CICLOS DE POTÊNCIA A VAPOR.....	13
3.6.1. O CICLO DE CARNOT.....	13
3.6.2. O CICLO RANKINE.....	13
3.7. ANÁLISE DE IRREVERSIBILIDADES E COMPONENTES REAIS	15
3.7.1. TURBOMÁQUINAS E ADAPTAÇÕES AUTOMOTIVAS	15
3.7.2. TROCADORES DE CALOR.....	16
3.7.3. CALDEIRAS E TRANSFERÊNCIA DE CALOR	17
4. METODOLOGIA.....	18
4.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA	18
4.2 DIAGNÓSTICO INICIAL DA BANCADA.....	19
4.2.1 A BANCADA.....	19
4.2.2 BOMBA	20
4.2.3 SENSOR DE NÍVEL	21
4.2.4 TUBOS E CONEXÕES	21
4.2.5 CALDEIRA	22
4.2.6 TURBINA.....	23
4.2.7 PRESSOSTATOS DIGITAIS.....	24
4.2.8 TERMÔMETRO	25
4.2.9 RADIADOR (SISTEMA DE RESFRIAMENTO)	25
4.2.10 CONDENSADOR	26
4.2.11 CIRCUITO DE AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA	27

4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO HISTÓRICO	27
4.4 DESENVOLVIMENTO DE MELHORIAS PARA A BANCADA	29
4.4.1. INVENTÁRIO DE DANOS E AUSÊNCIAS	29
4.4.2. ESTRATÉGIA DE REVITALIZAÇÃO	30
4.5 GUIA TÉCNICO DE MANUTENÇÃO INDIVIDUALIZADA.....	30
4.5.1. SUBSISTEMA DE BOMBEAMENTO E ALIMENTAÇÃO	31
4.5.2. SUBSISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR (CALDEIRA).....	31
4.5.3. SUBSISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE.....	32
4.5.4. SUBSISTEMA DE RESFRIAMENTO (RADIADOR E CONDENSADOR)	32
5. MANUAL DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA	33
5.1. JUSTIFICATIVA DA NÃO-OPERAÇÃO DO CICLO COMPLETO	33
5.2. PROTOCOLOS DE OPERAÇÃO PARCIAL.....	33
6. CONCLUSÃO.....	35
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
8. REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética global e a complexidade das matrizes energéticas contemporâneas exigem que o engenheiro mecânico possua uma compreensão profunda e prática dos ciclos de conversão de calor em trabalho. O Ciclo Rankine, fundamentado na vaporização e condensação de um fluido de trabalho, permanece como a principal forma de geração de eletricidade mundial, operando em usinas termelétricas a carvão, nucleares, de biomassa e ciclos combinados. No entanto, o ensino desses conceitos frequentemente colide com a dificuldade de reproduzir, em escala laboratorial, os fenômenos termodinâmicos que ocorrem em grandes centrais de potência.

A concepção de bancadas didáticas visa mitigar esse distanciamento, proporcionando aos discentes a oportunidade de visualizar transformações de fase, monitorar variações de entalpia e compreender as irreversibilidades inerentes aos processos reais. Neste contexto, a bancada didática da Faculdades Integradas de Aracruz (FAACZ), desenvolvida inicialmente em 2014, representa um esforço significativo de engenharia aplicada. O projeto original buscou integrar componentes industriais e automotivos adaptados para simular uma central de potência a vapor. Contudo, como ocorre com muitos protótipos acadêmicos, a descontinuidade de uso e a ausência de um plano de manutenção estruturado levaram à degradação do equipamento ao longo de uma década, sobretudo, por alterações não documentadas realizadas por outros discentes que culminou na inviabilidade do plano inicial de recuperação funcional da bancada.

A análise preliminar indicou desafios substanciais: a falta de documentação da parte elétrica, travamento mecânico de bombas devido à oxidação e, crucialmente, o desaparecimento da unidade expansora (turbina) e sua substituição por um rotor usinado domesticamente que não contribui para cálculos de trabalho, apenas com o papel funcional de um “catavento” demonstrando que há passagem de fluxo. Mais do que a simples substituição de peças, a situação exigiu uma reavaliação dos riscos operacionais. A manipulação de vapor pressurizado em ambientes acadêmicos requer rigorosos protocolos de segurança, frequentemente inviabilizados pela infraestrutura física disponível no momento.

Portanto, este trabalho não se limita a relatar a "reforma" de uma máquina, mas sim a produzir um documento de engenharia definitivo — um *Build Report* e Guia Técnico. Este documento justifica tecnicamente a decisão de não operar o ciclo completo em regime de potência neste estágio, focando na maximização do valor didático dos subsistemas remanescentes. Através de uma abordagem analítica, dissecam-se as decisões de projeto de 2014, comparam-se os dados de eficiência histórica com as limitações físicas encontradas e estabelecem-se diretrizes rigorosas para a manutenção preventiva, assegurando que o equipamento sirva como ferramenta pedagógica segura e eficiente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Elaborar um relatório técnico e um guia de manutenção para a recuperação da bancada didática de Ciclo Rankine, consolidando o histórico de projeto de 2014, visando a preservação do ativo e a segurança operacional acadêmica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a engenharia reversa do projeto original de 2014, detalhando especificações de materiais, dimensionamento de componentes e lógicas de controle utilizadas.
- Diagnosticar o estado atual dos subsistemas críticos (geração de vapor, condensação, bombeamento e instrumentação), identificando falhas, ausências e necessidades de substituição.
- Desenvolver um Guia Técnico de Manutenção Individualizada, fornecendo protocolos passo-a-passo para a inspeção, limpeza e reparo de cada componente.
- Estabelecer restrições operacionais de segurança, justificando tecnicamente a não operação do ciclo de potência completo devido às limitações de infraestrutura e à ausência de componentes certificados (turbina e proteções de caldeira e parte elétrica).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A compreensão das falhas e das potencialidades da bancada exige um domínio dos princípios que regem a termodinâmica de potência. A análise a seguir aborda as definições básicas, focando nas diferenças entre o ciclo ideal teórico da realidade operacional de uma bancada didática.

3.1 INTRODUÇÃO AOS CICLOS TERMODINÂMICOS

Ciclos termodinâmicos são fundamentais na ciência e engenharia de energia, pois envolvem uma sequência de processos pelos quais um fluido de trabalho (geralmente um gás ou líquido) passa, resultando em uma conversão eficiente de energia térmica em trabalho mecânico. Entre os ciclos mais comuns, destacam-se o ciclo de Carnot, o ciclo Brayton, o ciclo Otto e, particularmente relevante para usinas termelétricas, o ciclo Rankine (Moran & Shapiro, 2018).

Os ciclos termodinâmicos podem ser abertos, como em motores de combustão interna, ou fechados, como no caso do ciclo Rankine, utilizado em usinas para gerar eletricidade a partir de calor. A eficiência desses ciclos é limitada pelas leis da termodinâmica, o que estabelece parâmetros teóricos sobre como e quanta energia pode ser convertida de calor para trabalho mecânico (Munson et al., 2005).

3.2 AS LEIS DA TERMODINÂMICA

As leis da termodinâmica são a base dos estudos dos ciclos termodinâmicos, fornecendo os princípios fundamentais para a conversão de energia. Elas descrevem como a energia pode ser transformada e transferida dentro de um sistema e fornecem limites teóricos para a eficiência de conversão (Moran & Shapiro, 2018).

3.3 A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como o princípio da conservação de energia, afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra. Em termos matemáticos, a primeira lei é expressa como:

$$\Delta U = Q - W$$

Onde ΔU é a variação de energia interna do sistema, Q é o calor fornecido ao sistema e W é o trabalho realizado pelo sistema. Aplicada ao ciclo Rankine, a primeira lei garante que o calor adicionado à caldeira é convertido parcialmente em trabalho na turbina, com o restante sendo rejeitado no condensador (Moran & Shapiro, 2018).

3.4 A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

A segunda lei da termodinâmica introduz o conceito de entropia e estabelece que a entropia de um sistema isolado nunca diminui, ela só pode aumentar ou permanecer constante. Isso implica que todos os processos termodinâmicos têm uma direção preferida, tornando impossível a conversão de todo o calor fornecido em trabalho útil (Munson et al., 2005).

No contexto de usinas termelétricas, essa lei estabelece que a eficiência de conversão de calor em trabalho nunca pode atingir 100%. A equação de eficiência de Carnot, que é o limite teórico superior da eficiência de qualquer ciclo, é dada por:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{fria}}}{T_{\text{quente}}}$$

Onde T_{fria} e T_{quente} são as temperaturas absolutas das fontes fria e quente, respectivamente (Moran & Shapiro, 2018).

3.5 TERCEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A terceira lei da termodinâmica afirma que, à medida que a temperatura de um sistema se aproxima do zero absoluto, a entropia se aproxima de um valor constante. Embora essa lei tenha menos impacto direto no ciclo Rankine, ela estabelece limites fundamentais para o comportamento de sistemas a temperaturas extremamente baixas, como em processos de criogenia (Moran & Shapiro, 2018).

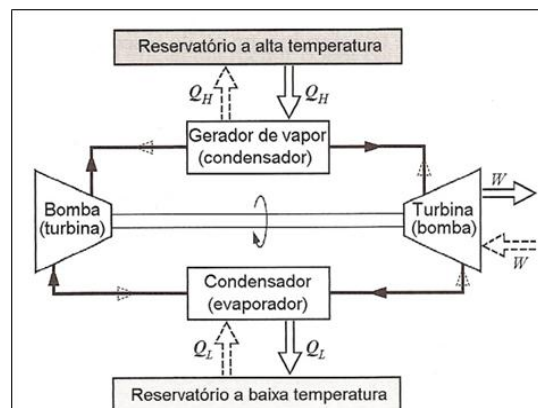
3.6. TERMODINÂMICA DOS CICLOS DE POTÊNCIA A VAPOR

3.6.1. O CICLO DE CARNOT

O ciclo de Carnot representa a máxima eficiência teórica para qualquer motor térmico operando entre duas temperaturas (T_h e T_c). Composto por dois processos isotérmicos e dois adiabáticos reversíveis, sua eficiência é função exclusiva das temperaturas absolutas da fonte e do sumidouro (Moran & Shapiro, 2018).

Embora fundamental como referência comparativa, o ciclo de Carnot é impraticável para o vapor d'água, visto na Figura 1. A compressão de uma mistura bifásica (vapor úmido) exigiria compressores capazes de lidar com grandes volumes específicos e gotículas líquidas simultaneamente, algo tecnologicamente inviável e danoso para as palhetas. Além disso, a transferência de calor isotérmica em pressões supercríticas ou variáveis é fisicamente complexa (Moran & Shapiro, 2018).

Figura 1 – Ciclo de Carnot



Fonte: Van Wylen (2003)

3.6.2. O CICLO RANKINE

O ciclo Rankine é amplamente utilizado na geração de eletricidade em usinas termelétricas e é baseado no princípio da transformação de calor em trabalho. Ele é composto por quatro etapas que envolvem compressão, aquecimento, expansão e rejeição de calor. O ciclo Rankine é preferido em muitas usinas devido à sua flexibilidade para trabalhar com diferentes tipos de fontes térmicas (como carvão, gás natural e biomassa) e por seu bom rendimento em diferentes condições operacionais (Munson et al., 2005).

O ciclo ideal é composto por quatro processos internamente reversíveis (figura 2):

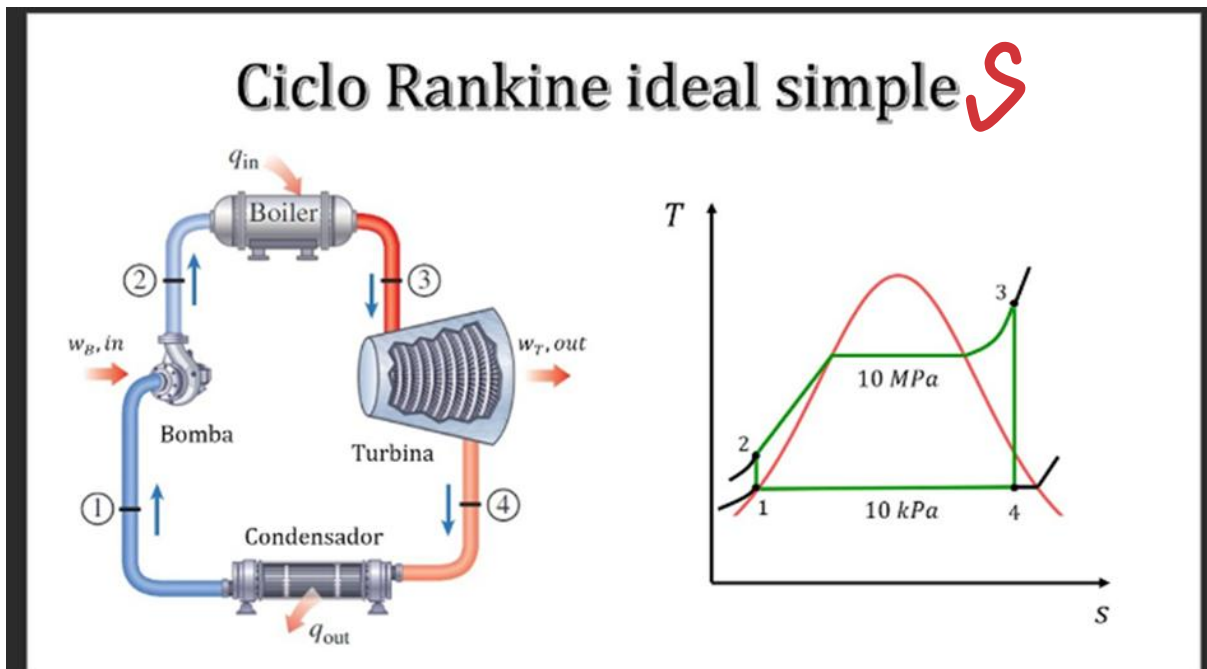
Processo Isentrópico de Compressão - Bomba (1-2): Neste estágio, o fluido de trabalho é bombeado para dentro da caldeira em sua fase líquida. A compressão isentrópica significa que não há variação na entropia do fluido, ou seja, o processo é adiabático (sem troca de calor) e reversível. A energia fornecida pela bomba é mínima, já que o fluido está na fase líquida, onde a densidade é maior e o trabalho necessário é menor (Moran & Shapiro, 2018). A entropia permanece constante ($s_1 = s_2$). O trabalho requerido é proporcional ao volume específico e à diferença de pressão $W_b \approx v \times \Delta P$.

Adição de Calor Isobárica - Caldeira (2-3): Após ser bombeado para a caldeira, o fluido líquido recebe calor a pressão constante até que se vaporize e atinja o estado de vapor superaquecido. Esse é o processo mais energético do ciclo, e a quantidade de calor adicionada pode ser calculada pela diferença de entalpias entre o fluido de trabalho nos estados líquido e vapor (Munson et al., 2005).

Expansão Isentrópica - Turbina (3-4): O vapor superaquecido é então direcionado para a turbina, onde ocorre a expansão isentrópica. O vapor se expande, reduzindo sua pressão e temperatura, e gera trabalho útil. Esse trabalho é aproveitado para acionar geradores que convertem energia mecânica em elétrica (Moran & Shapiro, 2018).

Rejeição de Calor Isobárica - Condensador (4-1): Após sair da turbina, o vapor entra no condensador, onde o calor é rejeitado a uma pressão constante. O vapor se condensa de volta ao estado líquido, completando o ciclo (Munson et al., 2005).

Figura 2 - Diagrama T-S (temperatura x entropia) de um ciclo Rankine Simples



Fonte: Moran e Shapiro (2018).

Na prática, como evidenciado nos dados de 2014 da bancada, as irreversibilidades distorcem este modelo. O atrito nos fluidos e as perdas mecânicas fazem com que a entropia aumente tanto na bomba quanto na turbina, desviando os processos da verticalidade no diagrama T-s (Temperatura-Entropia). Além disso, a queda de pressão nas tubulações da caldeira e do condensador impede que a troca de calor seja perfeitamente isobárica.

3.7. ANÁLISE DE IRREVERSIBILIDADES E COMPONENTES REAIS

3.7.1. TURBOMÁQUINAS E ADAPTAÇÕES AUTOMOTIVAS

A turbina é o componente crítico. Em grandes centrais, turbinas axiais ou radiais são projetadas aerodinamicamente para o volume específico do vapor. Na bancada da FAACZ, utilizou-se um turbocompressor automotivo (Biagio T2), conforme figura 3.

Figura 3 - Turbocompressor automotivo (Biagio T2)



Fonte: TCC 2014 Bancada Didática para simulação de uma central de potência – FAACZ

Turbos automotivos são projetados para gases de escape (ar quente e produtos de combustão), que se comportam como gases ideais compressíveis. O vapor d'água, especialmente próximo à saturação, comporta-se como um gás real com mudanças de fase. A expansão de vapor saturado em uma turbina não projetada para tal resulta em:

Baixa Eficiência Isentrópica: O perfil das palhetas não otimiza a extração de energia cinética do vapor, resultando em "estrangulamento" do fluido em vez de expansão com trabalho.

Erosão: Gotículas de água no vapor (título baixo) colidem com as palhetas em alta velocidade, causando erosão e desbalanceamento.

3.7.2. TROCADORES DE CALOR

De acordo com Moran & Shapiro, 2018, no ciclo Rankine, o trocador de calor desempenha papel fundamental na transferência de energia térmica entre diferentes fluidos ou partes do sistema, visando aumentar a eficiência do ciclo. Ele pode assumir diferentes funções dependendo da sua aplicação específica no ciclo. Algumas das funções principais incluem:

Aquecedor regenerativo: o trocador de calor é usado para pré-aquecer a água antes de ela entrar na caldeira. O calor é geralmente recuperado do vapor de escape ou de outros fluidos no ciclo. Essa etapa reduz a quantidade de energia necessária para vaporizar a água na caldeira, melhorando a eficiência térmica.

Condensador: no condensador, o trocador de calor resfria o vapor de escape da turbina, condensando-o de volta em líquido. Esse processo permite o reaproveitamento do fluido de trabalho no ciclo e reduz as perdas de calor.

Aquecedores intermediários (em ciclos Rankine de múltiplos estágios): em ciclos mais avançados, trocadores de calor podem ser usados entre estágios de turbinas para aquecer o fluido de trabalho de forma mais eficiente, utilizando calor residual ou de uma fonte secundária. No papel geral os trocadores no ciclo Rankine contribuem para:

- Melhorar a eficiência termodinâmica.
- Minimizar as perdas de calor.
- Reduzir o consumo de energia externa.
- Aproveitar melhor o calor residual.

Essas funções são cruciais para a operação de turbinas a vapor em usinas térmicas, como as de carvão, gás natural, e nucleares, bem como em aplicações industriais de cogeração.

3.7.3. CALDEIRAS E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

ÇENGEL, 2013, afirma que a caldeira da bancada opera sob princípios híbridos. A adição de calor ocorre tanto por radiação direta da chama no fundo do vaso quanto por convecção nos tubos espirais de pré-aquecimento. A eficiência térmica da caldeira (η_{caldeira}) é distinta da eficiência do ciclo (η_{ciclo}). Perdas de calor para o ambiente através das paredes não isoladas representam uma destruição de exergia significativa, exigindo mais combustível para atingir a mesma entalpia de vapor.

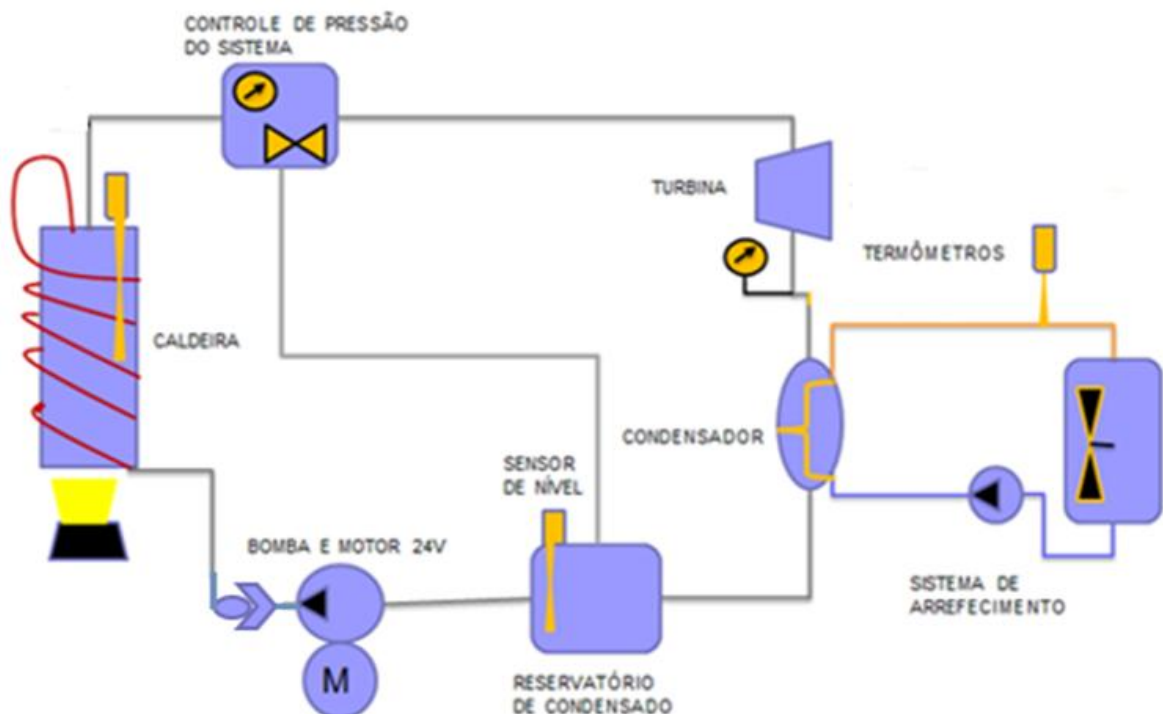
4. METODOLOGIA

A bancada se encontrava montada necessitando da verificação do funcionamento de cada componente para seu pleno funcionamento, bem como de outras melhorias complementares.

4.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A Figura 4 demonstra o esquema do ciclo montado na bancada didática. Tomando a bomba como ponto de partida, o fluido percorre o ciclo no sentido horário, passando pela caldeira e logo após por um controlador de pressão antes de ser direcionado à turbina, onde gera trabalho e posteriormente é direcionado ao condensador. A partir daí, é conduzido a um reservatório que possui sensores de níveis que enviam sinais elétricos à bomba, reiniciando o ciclo. A torre de resfriamento encontra-se na extremidade direita da Figura 5 e proporciona a troca de calor no interior do condensador.

Figura 4 - Esquema do Ciclo montado na bancada



4.2 DIAGNÓSTICO INICIAL DA BANCADA

A análise detalhada dos documentos originais permitiu reconstruir as especificações técnicas da bancada, essenciais para qualquer intervenção futura, atuando como o manual de construção do equipamento ("As-Built").

Após uma inspeção visual detalhada dos componentes críticos, como caldeira, condensador, turbina e bomba, foi verificada a falta da turbina, falhas elétricas, bomba travada e a necessidade de 02 baterias 12V para o funcionamento da bomba. Também foi realizada a análise dos componentes da bancada, verificando as condições de uso de todos os itens.

4.2.1 A BANCADA

Atualmente, a bancada está localizada no laboratório de mecânica da FAACZ, figura 5, instalada sobre uma estrutura de aço carbono de seção quadrada, 30 x 20 mm e dimensões gerais de 1,60 m de comprimento por 0,80 m de largura. Possui plataformas de madeira para suporte dos equipamentos que integram o sistema feito de compensado naval de 20 mm de espessura com resinas fenólicas resistentes à umidade, essenciais em um ambiente sujeito a vazamentos de vapor e condensado, figura 5. Na plataforma superior, encontram-se a maior parte dos componentes da bancada, como a caldeira, o trocador de calor, o motor, a bomba e o condensador. Já na plataforma inferior, está posicionado o reservatório que armazena o líquido condensado, além de algumas baterias que serão colocadas para funcionamento do sistema. O layout segue uma lógica de processo, a plataforma superior abriga os componentes quentes e de conversão, enquanto a inferior suporta os sistemas auxiliares, garantindo que, em caso de vazamento, a água flua para baixo sem atingir componentes eletrônicos críticos. A estrutura de madeira da bancada está em boas condições, necessitando apenas de uma limpeza para melhorar sua visualização.

Figura 5 - Bancada atual



Fonte: O autor (2025)

4.2.2 BOMBA

Está instalada uma bomba periférica de $\frac{1}{2}$ CV, com capacidade de vazão de 5 L/min, a qual é responsável pelo bombeamento do fluido (água) para o interior da caldeira. O acionamento da bomba é controlado por um sensor de nível, que, ao detectar níveis máximo ou mínimo do fluido, ativa automaticamente o sistema de bombeamento, figura 6.

Figura 6 - Bomba



Fonte: O autor (2025)

4.2.3 SENSOR DE NÍVEL

É um sensor do tipo chave capacitiva modelo FTC. Sua temperatura de trabalho pode variar de -20°C a 50°C . Se localiza abaixo do reservatório e sua conexão é feita através de rosca, figura 7.

Figura 7 - Sensor de nível



Fonte: O autor (2025)

4.2.4 TUBOS E CONEXÕES

O circuito do ciclo é majoritariamente interligado por tubos rígidos, havendo, em uma pequena parte, a utilização de tubos flexíveis. Todos os tubos empregados devem ter boa capacidade operacional para atuar no sistema, com o propósito de assegurar segurança, prevenir acidentes pessoais e evitar danos aos equipamentos, figura 8.

Figura 8 - Tubos e conexões da bancada



Fonte: O autor (2025)

4.2.5 CALDEIRA

A caldeira utilizada é feita em tubo de aço inoxidável com 5 mm de espessura, um diâmetro de 200 mm e altura de 400 mm. A caldeira, figura 9, foi circundada por tubulações de cobre dispostas em formato espiral, com o objetivo de recuperar parte do calor que normalmente se perde por condução através de suas paredes. Esse calor é utilizado para pré-aquecer o fluido condensado antes de sua introdução no interior da caldeira, o que resulta em uma significativa melhoria na eficiência térmica do sistema. Também é equipada com termômetros PT-100 para monitoramento da temperatura de saturação e transdutores de pressão eletrônicos com feedback digital.

Figura 9 - Caldeira



Fonte: O autor (2025)

4.2.6 TURBINA

A documentação de 2014 detalha o componente original, crucial para entender os dados obtidos. Utilizando um turbocompressor modelo Biagio AUT913 T2-.70/.58 pulsativo (originalmente aplicado em veículos Chevrolet S10 Diesel (2009), o projeto utilizava a carcaça quente (turbina) para expansão do vapor. A faixa de operação projetada situava-se entre 0,8 e 4,5 bar de pressão de entrada, indo a realização dos testes e medições necessários na bancada.

Entretanto a turbina foi removida e substituída por um rotor usinado domesticamente (figura 10) não sendo aplicável para cálculos teóricos de eficiência, somente para demonstrar a passagem do fluxo.

Figura 10 - Turbina



Fonte: O autor (2025)

4.2.7 PRESSOSTATOS DIGITAIS

É a parte do sistema responsável pela medição da pressão, e dessa forma nos mostrar através de um visor digital. Além disso, ele também é responsável por enviar sinal de comando para a válvula de segurança.

Figura 11 - Pressostato digital



Fonte: O autor (2025)

4.2.8 TERMÔMETRO

No topo da caldeira, temos instalado um termômetro para medição da temperatura, e na linha de fluido.

Figura 12 - Pressostato digital



Fonte: O autor (2025)

4.2.9 RADIADOR (SISTEMA DE RESFRIAMENTO)

A bancada dispõe de um sistema de resfriamento composto por um radiador automotivo (Fiat Uno 2006), cuja função será a de refrigerar a água aquecida proveniente do circuito de arrefecimento. O sistema de resfriamento é conectado a uma bomba centrífuga de rotor fechado, 0,5 CV e alimentada por tensão de rede (127 V), a qual é responsável tanto por bombear o fluido para a torre de resfriamento quanto por direcioná-lo ao condensador após o processo de resfriamento.

Figura 13 – Radiador e bomba



Fonte: O autor (2025)

4.2.10 CONDENSADOR

Conforme ilustrado na imagem abaixo, o modelo adotado para o resfriamento do fluido proveniente da turbina, com o objetivo de promover a mudança de seu estado físico, é do tipo trocador de calor de placas.

Figura 14 - Condensador

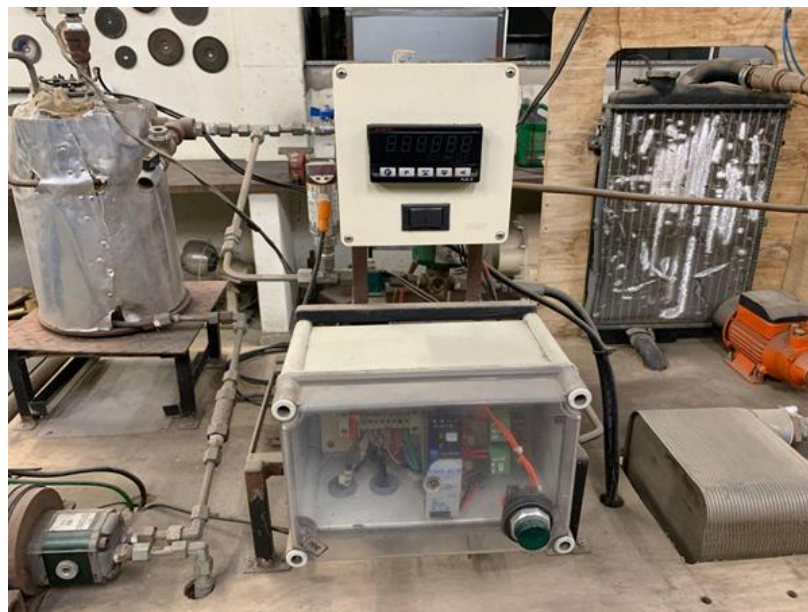


Fonte: O autor (2025)

4.2.11 CIRCUITO DE AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA

Trata-se de um circuito que recebe dados provenientes dos pressostatos e dos sensores de temperatura, e, a partir dessas informações, realiza o controle do sistema, assegurando o funcionamento adequado dos instrumentos de medição. Serão necessários testes de funcionamento de maneira detalhada para manter o funcionamento do circuito adequado.

Figura 15 - Circuito de automatização do sistema



Fonte: O autor (2025)

4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO HISTÓRICO

A tabela abaixo sintetiza os resultados médios obtidos nos testes originais, revelando a magnitude das perdas.

Tabela 1: Comparativo de Desempenho - Ciclo Ideal vs. Ciclo Real

Parâmetro	Unidade	Ciclo Ideal (Simulação 1)	Ciclo Real (Simulação 1)	Diferença Percentual
Pressão de Entrada (Turbina)	bar	6,178	6,30	+1,9%
Temperatura de Entrada	°C	160,0	160,8	+0,5%
Temperatura de Saída (Turbina)	°C	28,96	54,7	+88,8%
Entalpia de Saída (h4)	kJ/kg	2033,0	2603,0	+28,0%
Trabalho Específico da Turbina	kJ/kg	725,0	156,0	-78,5%
Eficiência Térmica (η)	%	27,47%	5,88%	-78,6%

Fonte: TCC 2014 Bancada Didática para simulação de uma central de potência - FAA02

→ AUTORES, ..., 2014

A discrepância massiva na eficiência (de 27,47% para 5,8%) não é aleatória e se relaciona com o fluido dentro da máquina.

O trabalho extraído pela turbina real (156 kJ/kg) foi uma fração minúscula do potencial teórico (725 kJ/kg). Isso indica que a turbina automotiva não expandiu o vapor

isentropicamente. Pelo contrário, o processo assemelhou-se a uma expansão isoentálpica, onde a pressão cai sem a realização significativa de trabalho útil.

A temperatura de saída real (54,7°C) e a entalpia elevada (2603 kJ/kg) mostram que o vapor saiu da turbina com muito mais energia interna do que deveria. No ciclo ideal, o vapor sairia a 28,96°C (temperatura de saturação na pressão do condensador). O excesso de calor rejeitado no condensador no caso real confirma que a energia que deveria virar trabalho foi desperdiçada como calor sensível e latente residual.

Conclui-se que a recuperação da bancada com a mesma configuração de turbina resultaria na mesma ineficiência. O problema é do projeto em sim, com a seleção inadequada da máquina de fluxo para as propriedades do vapor, não de manutenção.

4.4 DESENVOLVIMENTO DE MELHORIAS PARA A BANCADA

Primeiramente, para identificar as áreas críticas foi realizada uma inspeção detalhada para ser gerado o diagnóstico situacional e plano de ação, guiando as ações de recuperação, priorizando intervenções em componentes como o isolamento térmico ou a turbina. Pesquisar soluções na literatura técnica e em estudos de bancadas similares, avaliando o uso de materiais mais eficientes e tecnologias mais avançadas. Em seguida, submeter a testes preliminares para validar sua eficácia, assegurando que as alterações promovam melhorias reais no desempenho.

4.4.1. INVENTÁRIO DE DANOS E AUSÊNCIAS

A bomba de alimentação se encontrava travada, a falta de uso prolongada causou a oxidação e aderência dos componentes internos (provavelmente rotor e carcaça ou selo mecânico).

As baterias de alimentação do sistema elétrico da bomba (24 V) estavam degradadas ou ausentes. A fiação dos sensores apresentava sinais de envelhecimento, com risco de falhas de sinal ou curto-circuito e foi parcialmente refeita conseguindo aproveitar o que ainda estava funcional do sistema elétrico que apesar de poucos registros no projeto de 2014 também foi modificado sem ser documentado.

A estrutura se encontrava em boas condições gerais, exigindo apenas limpeza e tratamento estético.

O ventilador do radiador também estava travado, sem lubrificação e com a parte elétrica desmontada, Figura 16. A adequação foi feita e o ventilador se tornou operante.

Figura 16 – Ventilador do radiador



Fonte: O autor (2025)

4.4.2. ESTRATÉGIA DE REVITALIZAÇÃO

Devido à falta da turbina e os riscos de operar uma caldeira pressurizada sem certificação recente, a estratégia adotada é a revitalização modular. O objetivo não é "fechar o ciclo" imediatamente, mas restaurar a funcionalidade individual de cada componente para uso didático isolado.

4.5 GUIA TÉCNICO DE MANUTENÇÃO INDIVIDUALIZADA

Este guia destina-se a alunos e técnicos de laboratório, em que se detalha procedimentos para restaurar e manter cada subsistema, permitindo aulas práticas sobre componentes específicos (ex: curvas de bomba, calibração de sensores, troca térmica) sem a necessidade de operar o ciclo Rankine. A metodologia de manutenção baseou-se nos conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade (Moubray, 1997).

4.5.1. SUBSISTEMA DE BOMBEAMENTO E ALIMENTAÇÃO

4.5.1.1 PROCEDIMENTO DE DESTRAVAMENTO E RECUPERAÇÃO DA BOMBA

- Desconectar a bomba da alimentação elétrica (baterias) e hidráulica (fechar as válvulas de sucção e descarga).
- Remoção os parafusos da carcaça frontal da bomba, se O-ring de vedação estiver ressecado, deverá ser substituído.
- Verificar se há acúmulo de óxido ou calcário travando o impulsor contra a carcaça.
- Utilizar lixa d'água de granulação fina (600 ou 1200) para remover a oxidação do eixo e das faces do impulsor. O giro do eixo não deve ser feito com ferramentas pesadas para não empená-lo.
- Aplicar spray de silicone ou graxa atóxica no selo mecânico antes da remontagem.
- Antes de reconectar hidraulicamente, o motor deve ser alimentado com 24 V DC para verificar a rotação livre e o ruído dos rolamentos. Ruído de "arrasto" indica necessidade de troca dos rolamentos do motor.

4.5.1.1.1 MANUTENÇÃO DAS BATERIAS

- Instalar duas baterias de 12 V chumbo-ácidas novas, conectadas em série.
- Verifique a tensão individual periodicamente, leituras abaixo de 12,4 V indicam necessidade de recarga.

4.5.2. SUBSISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR (CALDEIRA)

4.5.2.1 PROCEDIMENTO DE LIMPEZA E INSPEÇÃO

- Realizar inspeção visual procurando pontos de corrosão (pites) na superfície externa do inox e nas soldas dos niples pois corrosão em inox sob pressão é crítica.
- Limpeza Interna para drenar qualquer resíduo líquido pelo bujão inferior. Se houver calcificação visível, realizar uma lavagem química circulando uma solução de ácido cítrico a 5% (aquecida a 50°C) por 30 minutos, seguida de enxágue abundante com água desmineralizada. Isso melhora a transferência de calor e evita a corrosão do depósito.
- Inspecionar os tubos de cobre externos quanto à amassados ou vazamentos.

4.5.3. SUBSISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE

4.5.3.1 MANUTENÇÃO DE SENSORES DE NÍVEL CAPACITIVOS

Acúmulo de biofilme ou sujeira na haste do sensor altera a constante dielétrica percebida, causando leituras falsas (bomba não liga quando deveria ou não desliga, causando transbordo). Por isso deve-se remover o sensor do reservatório e limpar a haste delicadamente com álcool isopropílico e um pano macio. Não deve ser utilizado abrasivos que possam danificar o revestimento isolante da sonda.

4.5.3.2 CALIBRAÇÃO DE PRESSOSTATOS

Utilizar uma fonte de ar comprimido regulada e um manômetro padrão calibrado, pressurizando a linha do pressostato digital e comparar a leitura do display com o padrão. Ajustes de "offset" podem ser necessários no menu do controlador eletrônico.

4.5.4. SUBSISTEMA DE RESFRIAMENTO (RADIADOR E CONDENSADOR)

4.5.4.1 LIMPEZA DO TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

Realizar retrolavagem (*backflush*) conectando mangueiras de água limpa no sentido oposto ao fluxo normal de operação para desalojar sedimentos particulados.

4.5.4.2 MANUTENÇÃO DO RADIADOR

- Utilizar ar comprimido de baixa pressão para limpar a poeira das aletas externas do radiador. Aletas obstruídas reduzem drasticamente a eficiência da convecção forçada.
- Verificar a integridade das mangueiras de borracha automotivas; ressecamento ou trincas exigem substituição imediata para evitar ruptura durante a operação da bomba de água fria.

5. MANUAL DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA

5.1. JUSTIFICATIVA DA NÃO-OPERAÇÃO DO CICLO COMPLETO

A decisão da não operação do ciclo de Rankine completo (geração de vapor > expansão > condensação) baseia-se em três pilares de risco inaceitáveis no contexto atual:

- Risco de Ruptura por Pressão: A caldeira, fabricada em 2014, não possui laudo de teste hidrostático recente conforme a norma regulamentadora NR-13. Após 10 anos de inatividade e possíveis corrosões internas não detectadas, pressurizá-la a 8 bar com vapor (fluido compressível de alta energia acumulada) em um laboratório sem barreira de contenção representa risco de explosão.
- Ausência de Consumidor de Potência (Turbina): Sem a turbina, não há componente para expandir o vapor e reduzir sua pressão/temperatura antes do condensador. Conectar a saída da caldeira diretamente ao condensador (bypass) submeteria o trocador de placas a choques térmicos e pressões acima de sua especificação nominal, além de risco de golpe de arfete violento.
- Falha de Segurança Ativa: O sistema não possui redundância comprovada no controle de chama. Se a bomba de alimentação (recém-destravada) falhar durante a operação com o fogareiro aceso, a água secará rapidamente, levando ao superaquecimento do metal e potencial fusão ou ruptura catastrófica, pois não há sistema automatizado de corte de gás (*trip*) vinculado ao nível de água.

5.2. PROTOCOLOS DE OPERAÇÃO PARCIAL

A bancada pode ser utilizada para experimentos que não envolvam pressurização de vapor.

- Experimento A: Curva da Bomba e Controle de Nível

- **Objetivo:** Estudar a histerese do sensor de nível e a vazão da bomba.
- **Procedimento:** Com a caldeira aberta para a atmosfera (sem pressão) e fria, operar o sistema de alimentação. Medir o tempo necessário para encher o volume conhecido da caldeira. Verificar os pontos de liga/desliga do sensor capacitivo.

- **Experimento B: Eficiência do Trocador de Calor (Água-Água)**

- **Objetivo:** Analisar a troca térmica no radiador e no condensador usando apenas água morna (abaixo de 50°C).
- **Procedimento:** Circular água aquecida externamente (ou pela caldeira operando aberta a baixa temperatura, $<60^{\circ}\text{C}$) pelo circuito primário e operar a torre de resfriamento. Medir as temperaturas de entrada e saída para calcular a efetividade (ϵ) do trocador.

FAÇAM ESSES EXPERI-
MENTOS E COLOQUEM
OS RESULTADOS !!

6. CONCLUSÃO

A recuperação da bancada didática de Ciclo Rankine da FAACZ, documentada neste relatório, transcende a simples manutenção corretiva. Ela representa um exercício profundo de engenharia diagnóstica e responsabilidade técnica. A análise comparativa entre o ideal teórico e a realidade operacional de 2014 revelou as limitações intrínsecas da adaptação de componentes automotivos para ciclos de vapor, fundamentando a baixa eficiência exergética encontrada (5,7%).

O diagnóstico atual, marcado pela ausência da turbina e pela degradação dos sistemas de bombeamento, impôs uma mudança de paradigma: de uma "microcentral de potência" potencialmente perigosa para um conjunto de "módulos didáticos" seguros. O guia técnico desenvolvido fornece o roteiro necessário para que alunos e técnicos mantenham esses módulos funcionais.

A decisão de restringir a operação do ciclo completo é uma medida de preservação da integridade física dos usuários, alinhada com as melhores práticas de segurança em engenharia. Futuros trabalhos devem focar na aquisição de uma microturbina didática adequada e na certificação NR-13 do vaso de pressão, permitindo, eventualmente, o fechamento seguro do ciclo. Em suma, este trabalho redefiniu o propósito do equipamento. Ao invés de insistir na operação de um ciclo termodinamicamente ineficiente e operacionalmente perigoso, entregou-se à instituição um laboratório de instrumentação e processos térmicos documentado. A bancada deixa de ser um 'ciclo Rankine que não funciona' para se tornar um conjunto de módulos didáticos de troca térmica e mecânica dos fluidos operacionais e seguros, cumprindo seu papel pedagógico com responsabilidade técnica.

COLOCAR NA
CONCLUSÃO



7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para viabilizar o retorno da operação do ciclo completo em fases posteriores, recomenda-se:

- Aquisição de Turbina Didática: Substituir a adaptação automotiva por uma turbina de ação simples (tipo DeLaval) projetada especificamente para vapor saturado de baixa pressão, ou um motor a vapor de pistão, que oferece melhor torque em baixas rotações e é visualmente mais didático.
- Adequação à NR-13: Realizar inspeção profissional da caldeira, incluindo medição de espessura por ultrassom e teste hidrostático certificado a 1,5 vezes a PMTA.
- Automação de Segurança: Implementar um sistema de intertravamento (PLC ou relé lógico) que corte automaticamente a solenoide de gás do fogareiro caso o nível de água atinja o ponto crítico mínimo ou a bomba falhe.
- Gerador Elétrico: Acoplar um pequeno gerador DC ao eixo da futura turbina para permitir o cálculo da eficiência elétrica global, fechando o balanço de energia completo da planta.

8. REFERÊNCIAS

1. BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. Fundamentals of Thermodynamics. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2019.
2. BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-13: Caldeiras e Vasos de Pressão. 2019.
3. ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
4. DIAPASON, J. P. Máquinas Térmicas: Motores e Turbinas. 2. ed. São Paulo: Érica, 2004.
5. FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Introdução à mecânica dos fluidos. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
6. INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
7. da engenharia química. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
8. LEÃO, B. M. C. Manual de Inspeção de Equipamentos e Tubulações Industriais. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
9. MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. Princípios de termodinâmica para engenharia. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
10. MOUBRAY, J. Manutenção Centrada na Confiabilidade. 2. ed. São Paulo: IMAM, 1997.
11. MUNSON, Bruce Roy; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

12. POTTER, Merle C.; SCOTT, Elaine P. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.
13. SCAGNOLATTO, G. Análise teórica de ciclos Rankine orgânico e projeto de bancada de testes em pequena escala. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020
14. SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. Introdução à termodinâmica PALMER, J. D. Maintenance Planning and Scheduling Handbook. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.