

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES**  
**CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS**  
**Coordenação de Formação Científica**

Cristiano Garcia Rosa

**PROJETO DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE UMA PLANTA**  
**DIDÁTICA DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA**

**Rio de Janeiro**

**2019**



Centro Brasileiro de  
Pesquisas Físicas

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Cristiano Garcia Rosa

## **PROJETO DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE UMA PLANTA DIDÁTICA DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Coordenação de Formação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

Orientadores: Prof. Dr. Alexandre Mello de Paula Silva (CBPF)  
Prof. Dr. Romeu Abrahão Pereira (CBPF)

**Rio de Janeiro - RJ**

**2019**

## AGRADECIMENTOS

Em meio a grande satisfação escrevo meus agradecimentos, em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por ter me mantido firme em meu propósito pois mesmo em dias de dificuldades e desânimo me dava forças para continuar, e por me apresentar no decorrer desta trajetória pessoas tão especiais que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, nesta renomada instituição. Em especial meu Orientador Prof. Doutor Alexandre Mello de Paula Silva, e ao meu antigo orientador Prof. Doutor Herman Pessoa Lima Júnior por compartilharem seus conhecimentos com dedicação e paciência na construção deste trabalho.

Agradeço imensamente ao idealizador do projeto Prof. Doutor Romeu Abraão Pereira, pela oportunidade, pelas discussões, análises de resultados, revisões e o suporte para que todo esse trabalho pudesse ser concluído. Muito obrigado, por ser mais do que um orientador, por ser um amigo sempre zelando pelo futuro.

Agradeço à instituição FACTHUS na qual trabalho e que me trouxe a possibilidade do desenvolvimento deste trabalho, pelo suporte e acesso aos laboratórios e equipamentos utilizados. Um agradecimento especial ao diretor George Kemil Abdalla e aos meus supervisores Leandro Aureliano da Silva e Willian Gigo. Um “muito obrigado” a todo corpo docente das engenharias em especial aos professores Antonio Carlos Lemos Júnior, Thiago Antônio Silva e professora Aline Alves Ribeiro que me auxiliaram diretamente na construção desse trabalho compartilhando experiências e saberes, obrigado pelo apoio e incentivo.

Agradeço a todos da empresa Realiza Máquinas com os quais também compartilho meu saber profissional cotidianamente, em especial ao meu chefe direto Danilo dos Santos Cardoso e aos diretores Marcelo Prado, Carlos Alberto Bianco e Gilvan Roza, por compreenderem a importância deste trabalho para meu desenvolvimento profissional, e por estarem sempre abertos ao diálogo e por me concederem alguns dias de recesso para realização de algumas etapas deste trabalho, a toda equipe Realiza Máquinas meu “muito obrigado”.

Deixo também meu agradecimento a meu companheiro de projeto Joubert Vieira dos Santos, por sempre poder contar nos momentos de dúvidas com bastante parceria, e a todos meus colegas do Mestrado Profissional: Eduardo, Cleiton e Nelson.

Agradeço à minha Família em especial meus pais Maria Aparecida Garcia e Calixto Rosa Neto por toda atenção, compreensão. Agradeço demasiadamente a vocês por me ensinarem valores tão nobres como a coragem, a resistência, o companheirismo, sem vocês não teria sido possível finalizar este trabalho.

Agradeço a minha querida namorada Wanessa Varjão Alves pelo companheirismo, por buscar compreender minhas ausências durante a escrita desse trabalho, você já faz parte de minha vida e é alguém que quero levar pra sempre ao meu lado. Obrigado por aturar meus dias de estresse e continuar comigo, me apoiando e dando força. Essa vitória também é sua.

Por fim agradeço de modo geral, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a construção desse trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema supervisório para operação e monitoramento de um protótipo de geração de potência usando o *software* Indusoft Web Studio. Trata-se de uma planta desenvolvida para fins didáticos baseada nos ciclos de geração Brayton-Rankine para o qual o controle de temperatura e pressão em determinados pontos do processo é primordial para que se tenha um desempenho mais próximo do projetado. Neste projeto, placas microcontroladas Arduino Uno são utilizadas no processamento dos sinais fornecidos por instrumentos sensores instalados na planta e em seguida essas informações são enviadas para a tela do supervisório, local onde o operador do equipamento realiza o monitoramento das variáveis e também executa comandos para o acionamento dos atuadores presentes no protótipo.

**Palavras-chave:** Geração de potência, controle, supervisório, Arduino.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a supervisory system for the operation and monitoring of a power generation prototype using Indusoft Web Studio software. This prototype is a plant developed for didactic purposes based on the Brayton-Rankine generation cycles for which the control of temperature and pressure at certain points of the process is paramount so that its performance can be as close as possible to the designed one. In this project, Arduino Uno microcontrollable boards are used in the processing of the signals provided by the sensors installed in the plant and then this information is sent to the supervisor screen where the operator of the equipment performs the monitoring of the variables and also executes commands for the activation of the actuators present in the prototype.

**Key-words:** Power Generation, control, supervisory, Arduino.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Sistema de controle em malha aberta e fechada.....	13
FIGURA 2 – Interação entre operadores e sistema supervisório.....	14
FIGURA 3 – Sistema de supervisão e controle industrial.....	14
FIGURA 4 – Protótipo de geração de potência desenvolvido.....	16
FIGURA 5 – Parte interna do protótipo.....	17
FIGURA 6 – Fluxo através das serpentinas do Ciclo Brayton no protótipo.....	18
FIGURA 7 – Fluxo através das serpentinas do Ciclo Rankine no protótipo.....	19
FIGURA 8 – Fluxograma de sinais e dados.....	17
FIGURA 9 – Sonda do termopar K utilizado.....	22
FIGURA 10 – Módulo com CI MAX6675.....	22
FIGURA 11 – Pinagem do CI MAX6675.....	22
FIGURA 12 – Medição da temperatura com termômetro com infravermelho.....	23
FIGURA 13 – Teste de medição de temperatura com termopares tipo K.....	24
FIGURA 14 – Gráfico com a medição de temperatura de um ferro de solda ligado.....	25
FIGURA 15 – Gráfico com a medição de temperatura ambiente.....	25
FIGURA 16 – Efeito piezoelétrico.....	26
FIGURA 17 – Sensor MPX5700AP.....	27
FIGURA 18 – Detalhes internos sensor MPX5700AP.....	27
FIGURA 19 – Diagrama de blocos do circuito interno do MPX5700AP.....	28
FIGURA 20 – Ligação entre MPX5700AP e Arduino Uno.....	28
FIGURA 21 – Dimensões construtivas do sensor MPX5700AP.....	29
FIGURA 22 – Sensor MPX5700AP instalado.....	29
FIGURA 23 – Teste de medição de pressão.....	30
FIGURA 24 – Gráfico com a medição de pressão de uma linha de ar comprimido.....	31
FIGURA 25 – Tanque reservatório de água.....	31
FIGURA 26 – Chave de nível.....	32
FIGURA 27 – Dimensões construtivas da chave de nível.....	32
FIGURA 28 – Funcionamento chave de nível horizontal.....	33
FIGURA 29 – Ligações entre chave de nível e Arduino.....	33
FIGURA 30 – Sensor de vazão YF-S201.....	34
FIGURA 31 – Interior do sensor de vazão YF-S201.....	34
FIGURA 32 – Dimensões construtivas do sensor YF-S201.....	35
FIGURA 33 – Sensor YF-S201 instalado.....	35
FIGURA 34 – Fios de conexão do sensor YF-S201.....	35
FIGURA 35 – Esquema de ligação entre sensor de vazão YF-S201 e Arduino Uno.....	36
FIGURA 36 – Sensor LDR.....	37
FIGURA 37 – Módulo com Sensor LDR.....	37
FIGURA 38 – Esquema de ligação entre módulos LDR e Arduino Uno.....	38
FIGURA 39 – Módulo LDR instalado próximo ao queimador.....	38
FIGURA 40 – Válvula de água.....	39
FIGURA 41 – Válvula de gás.....	40
FIGURA 42 – Eletrodo centelhador.....	40

FIGURA 43 – Usina ignitora.....	40
FIGURA 44 – Compressor elétrico de pistão.....	41
FIGURA 45 – Placa de identificação do compressor elétrico.....	41
FIGURA 46 – Bomba de diafragma.....	42
FIGURA 47 – Placa de identificação da bomba d’água.....	42
FIGURA 48 – Placa Arduino Uno.....	43
FIGURA 49 – IDE Arduino versão 1.8.2.....	44
FIGURA 50 – Módulo com 4 relés.....	45
FIGURA 51 – Esquemático com as ligações ao módulo relé.....	45
FIGURA 52 – Painel com módulo com 4 relés.....	46
FIGURA 53 – Ciclo pergunta-resposta.....	47
FIGURA 54 – Barramento Modbus RS-485 à dois fios.....	48
FIGURA 55 – Módulo com <i>chip</i> MAX485.....	48
FIGURA 56 – Ligação do Arduíno ao conversor MAX485.....	49
FIGURA 57 – Chip MAX485.....	49
FIGURA 58 – Conversor RS485 - USB.....	50
FIGURA 59 – Esquema de comunicação com MAX485.....	50
FIGURA 60 – Conectores utilizados nas PCI.....	51
FIGURA 61 – Modelo de PCI “A” (face com os conectores para encaixe) .....	51
FIGURA 62 – Modelo de PCI “A” (face com as trilhas de ligação) .....	52
FIGURA 63 – Modelo de PCI “A” com os dispositivos conectados.....	52
FIGURA 64 – Modelo de PCI “B” (face com os conectores para encaixe) .....	52
FIGURA 65 – Modelo de PCI “B” (face com as trilhas de ligação) .....	53
FIGURA 66 – Modelo de PCI “B” com os dispositivos conectados.....	53
FIGURA 67 – Acomodação dos Arduinos Uno dentro do painel.....	54
FIGURA 68 – Painel de armazenamento dos Arduinos Uno.....	54
FIGURA 69 – Tela principal do <i>software</i> Indusoft Web Studio.....	55
FIGURA 70 – Janela de configuração de parâmetros do <i>driver</i> de comunicação.....	58
FIGURA 71 – Janela de configuração de parâmetros avançados do <i>driver</i> de comunicação....	58
FIGURA 72 – Ciclo Brayton aberto.....	59
FIGURA 73 – Ciclo Brayton fechado.....	60
FIGURA 74 – Ciclo Brayton: (a) diagrama P x V; (b) diagrama T x S.....	60
FIGURA 75 – Tela do ciclo Brayton do supervisório desenvolvido.....	63
FIGURA 76 – Ciclo Rankine: componentes básicos.....	64
FIGURA 77 – Ciclo Rankine: diagrama temperatura-entropia T x S.....	64
FIGURA 78 – Ciclo Rankine com reaquecimento: componentes básicos.....	67
FIGURA 79 – Ciclo Rankine com reaquecimento: diagrama temperatura-entropia T x S.....	68
FIGURA 80 – Tela do ciclo Rankine do supervisório desenvolvido.....	69
FIGURA 81 – Ciclo combinado Brayton-Rankine. Diagrama dos componentes principais.....	71
FIGURA 82 – Ciclo combinado Brayton-Rankine. Diagrama T x S.....	71
FIGURA 83 – Tela principal do supervisório desenvolvido.....	72
FIGURA 84 – Botão para transferência de água.....	74
FIGURA 85 – Lâmpada indicativa do status da transferência de água.....	74
FIGURA 86 – Fluxograma da rotina de transferência de água.....	75

FIGURA 87 – Botão para acendimento dos queimadores.....	76
FIGURA 88 – Lâmpadas indicativas do estado dos queimadores.....	77
FIGURA 89 – Fluxograma da rotina de acendimento/monitoramento das chamas.....	77
FIGURA 90 – Modelos de trocas de calor no economizador.....	81
FIGURA 91 – Modelos de trocas de calor no super-aquecedor.....	81
FIGURA 92 – Diagrama T x S do ciclo Rankine.....	82
FIGURA 93 – Gráfico com a medição de temperatura da água na entrada do ciclo Rankine ( $T_1$ )....	83
FIGURA 94 – Gráfico com a medição de temperatura após o economizador no ciclo Rankine..	83
FIGURA 95 – Gráfico com a medição de temperatura na entrada do aquecedor no ciclo Rankine.	84
FIGURA 96 – Gráfico com a medição de temperatura na entrada do super-aquecedor.....	84
FIGURA 97 – Gráfico com a medição de temperatura na saída do super-aquecedor ( $T_3$ ).....	85
FIGURA 98 – Gráfico com a medição de temperatura do ar na entrada do ciclo Brayton ( $T_5$ )...	86
FIGURA 99 – Gráfico com a medição de pressão na entrada do ciclo Brayton ( $P_6$ ).....	86
FIGURA 100 – Gráfico com a medição de temperatura do gás na saída do ciclo Brayton.....	87
FIGURA 101 – Gráfico com valores teóricos de rendimento $\eta$ versus razão de pressão $r_p$ .....	88
FIGURA 102 – Gráfico com valores teóricos de trabalho útil $\dot{W}_u$ versus razão de pressão $r_p$ ....	89
FIGURA 103 – Planta do ciclo combinado com os valores obtidos.....	90
FIGURA 104 – Gráfico com a medição dos gases de combustão na região da chaminé....	92

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Termopares comuns.....	21
TABELA 2 – Descrição dos pinos do MAX6675.....	23
TABELA 3 – Principais especificações do Arduino Uno.....	43
TABELA 4 – Formato da mensagem no modo de transmissão RTU.....	48
TABELA 5 – Lista de <i>Tags</i> do projeto.....	57
TABELA 6 – Entalpias em pontos do Rankine.....	80

## LISTA DE SIMBOLOS

$C_p$  – calor específico a pressão constante

$C_v$  – calor específico a volume constante

$h$  – entalpia específica

$K$  – constante de equilíbrio

$\dot{m}$  – fluxo de massa

$\eta$  – eficiência ou rendimento

$P$  – pressão

$\dot{Q}$  – calor transferido por unidade de tempo

$r_p$  – razão de pressão

$s$  – entropia específica

$T$  – temperatura

$\dot{W}$  – potência (trabalho por unidade de tempo)

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS .....	15
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
3.1	Planta de Geração de Potência .....	16
3.2	Descrição Física.....	19
3.3	Elementos sensores .....	20
3.3.1	Termopar com Módulo MAX6675.....	20
3.3.2	MPX5700AP .....	26
3.3.3	Chave de nível .....	31
3.3.4	Sensor de vazão YF-S201 .....	33
3.3.5	Módulo com LDR .....	36
3.4	Elementos atuadores.....	39
3.4.1	Válvula de água.....	39
3.4.2	Válvula de gás GLP .....	39
3.4.3	Usina ignitora e eletrodo centelhador .....	40
3.4.4	Compressor elétrico.....	41
3.4.5	Bomba elétrica .....	41
3.4.6	Placas microcontroladas Arduino Uno .....	42
3.4.7	IDE do Arduino.....	44
3.4.8	Módulo Relé .....	45
3.4.9	Comunicação Modbus .....	46
3.4.10	Módulo MAX485 .....	48
3.4.11	PCIs Desenvolvidas.....	50
3.4.12	Painel eletrônico.....	53
3.5	Supervisório desenvolvido.....	54
3.5.1	<i>Tags</i> .....	56
3.5.2	<i>Driver</i> de comunicação.....	57
3.6	Os Ciclos Termodinâmicos de Potência.....	59
3.6.1	O Ciclo Brayton .....	59
3.6.2	O Ciclo Rankine .....	63
3.6.3	O Ciclo Combinado Brayton-Rankine.....	70
3.7	Sistema de partida da planta de geração de Potência .....	73
3.7.1	Transferência de água para a planta .....	74
3.7.2	Sistema de ignição e monitoramento dos queimadores .....	76
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos quarentas anos, o controle e a supervisão dos processos e operações, em áreas de pesquisa tecnológica, produção industrial e ciência aplicada, tornaram-se cada vez mais importantes e necessários, exigindo estudos e aplicações de vários tipos de análise funcional e estrutural, as quais permitem coleta e centralização de informações e dados em tempo real (LAMBERT; RIERA; MARTEL, 1999) (COTTET; GROLLEAU, 2005).

Existem vários tipos de métodos que são usados na análise estrutural e funcional nos setores da indústria, ciência e tecnologia (LAKHOUA, 2010). A análise funcional (AF) permite a descrição sintética de modo operante de sistemas e o conhecimento das funções controladoras dos processos, inclusive a conhecida técnica de modelagem gráfica (COTTET; GROLLEAU, 2005).

Atualmente, com os avanços da eletrônica e das tecnologias de *software*, o chamado Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de Dados SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*) refere-se aos sistemas de controle e automação industrial, aos *softwares* que monitoram e controlam os processos e operações em infraestrutura de telecomunicações (VALVANO; AHMAD; NAYAK, 1999), em plantas de geração de potência térmica e elétrica (LAKHOUA, 2010) (PILLAI; MEHTA; PATEL, 2001), e em atividades educacionais para formação profissional de diferentes campos da engenharia de automação (REYNARD, 2008).

O termo controle de processos costuma ser utilizado para se referir aos sistemas que têm por objetivo manter certas variáveis de uma planta industrial entre os seus limites operacionais desejáveis. Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou fechada. Em malha aberta, o operador define a abertura de uma válvula para obter uma certa vazão desejada. Em malha fechada existe um controlador que compara o valor desejado com o valor medido e se houver um desvio entre esses valores, manipula a sua saída de forma a eliminar este desvio ou erro (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006). A figura 1 ilustra os sistemas de controle em malha aberta e fechada.

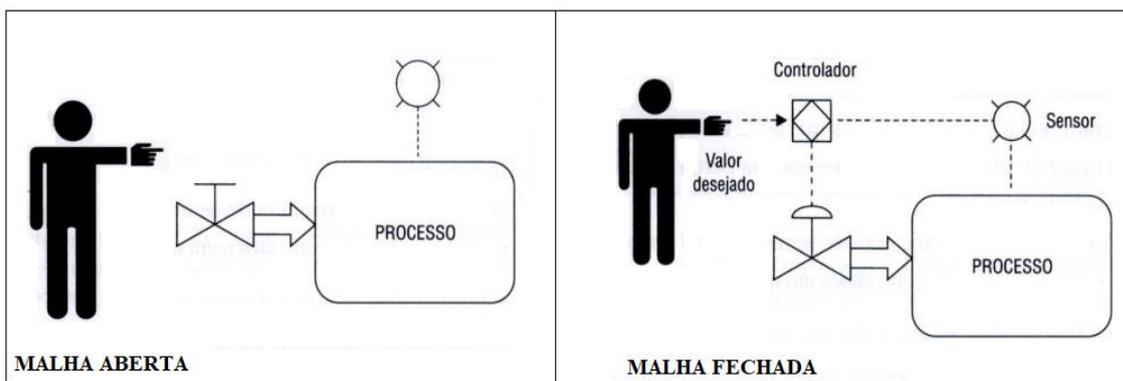


FIGURA 1 – Sistema de controle em malha aberta e fechada.  
 FONTE: Campos e Teixeira (2006).

Todos os processos na área industrial requerem controladores de alta confiança que consequentemente possuem alto custo. Entretanto, em muitas ocasiões podemos aplicar soluções de baixo custo, se utilizarmos controladores microcontrolados. A plataforma Arduino proporciona o desenvolvimento rápido de soluções que podem ser facilmente embarcadas ou aplicadas a processos simplificados. Essa plataforma pode ser amplamente utilizada em soluções de menor porte, como pequenas empresas, escritórios, comércio, além de ser uma excelente solução para aplicações de automação e instrumentação residencial (STEVAN JR.; SILVA, 2015).

Segundo Aihara et al. (2001), um sistema supervisório é um sistema responsável pelo monitoramento de variáveis de controle de um processo que possui como objetivo principal fornecer subsídios ao operador para que este controle ou monitore um sistema automatizado mais rapidamente, permitindo a leitura das variáveis em tempo real e seu gerenciamento e controle. Um sistema supervisório também pode ser definido como uma interface homem máquina (IHM) amigável que possibilita alterar valores das variáveis, comandar dispositivos físicos conectados ao sistema, reconhecer alarmes, acompanhar gráficos de tendência das variáveis e emitir relatórios. A figura 2 apresenta operadores monitorando o processo através da tela de um supervisório.



FIGURA 2 – Interação entre operadores e sistema supervisório.  
 FONTE: Exons Solutions (2017).

Num sistema automatizado, são utilizados sensores para a aquisição de informações dos sistemas controlados, os quais convertem parâmetros físicos – tais como a presença física de um corpo, níveis de água, temperatura etc. – em sinais analógicos e digitais para estações remotas. Os atuadores são usados, como o próprio nome indica, para atuar no sistema, podendo ser considerados dispositivos de saída das unidades remotas. A figura 3 apresenta um diagrama simplificado detalhando o fluxo de dados entre um operador e as tarefas que são executadas dentro de um *software* de supervisão e controle industrial.

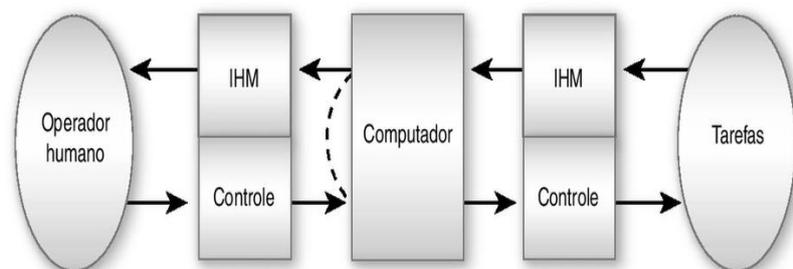


FIGURA 3 – Sistema de supervisão e controle industrial.  
 FONTE: Rosário (2005).

Atualmente os sistemas de automação industrial fazem uso de tecnologias de computação e comunicação para facilitar a monitoramento e controle dos processos industriais, realizando a coleta de dados em ambientes complexos, geralmente distantes geograficamente, e apresentando-os de modo amigável e objetivo ao operador, com elaborados recursos gráficos e conteúdos multimídias, facilitando, assim, a sua tomada de decisão (ROSÁRIO, 2005).

## 2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é o projeto e a implementação de um sistema supervisorio, integrante da operação de uma mini planta de geração de potência operando em ciclos térmicos. O supervisorio tem a capacidade de monitorar a operação e fornecer dados de temperatura e pressão em função do tempo real de operação, em forma de gráficos de registro. Para verificação do desempenho e confiabilidade do sistema desenvolvido, serão obtidos resultados que permitam comparações com os valores de projeto da planta térmica usando os ciclos de potência Brayton, operando com ar como substância de trabalho, e o ciclo de potência Rankine em planta de geração de vapor, em conformação estrutural em um mesmo arranjo, o qual permite a combinação dos dois ciclos em operação conjunta de modo que se obtenha geração com ganho em eficiência. Para garantir a segurança das pessoas que vierem operar a planta é projetado um sistema que realiza o corte do fornecimento de gás GLP para os queimadores em caso da extinção das chamas causado por alguma falha. Também é projetado um sistema que realiza a transferência de água entre o tanque reservatório e o trocador de calor em quantidade necessária para realização de um teste.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Planta de Geração de Potência

A figura 4 mostra uma vista externa do protótipo da planta de potência construído e, a figura 5 exhibe o seu interior com os queimadores, os aquecedores e os trocadores de calor. O combustível para o funcionamento do protótipo é o GLP (gás liquefeito de petróleo). Por se misturar mais facilmente com o oxigênio, sua queima é rápida e eficiente e gera menor quantidade de resíduos (fuligem). Seus constituintes mais importantes são: propano ( $C_3H_8$ ), propeno ( $C_3H_6$ ), isobutano ( $C_4H_{10}$ ), n-butano ( $C_4H_{10}$ ) e buteno ( $C_4H_8$ ).



FIGURA 4 – Protótipo de geração de potência desenvolvido.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

No ciclo Brayton, o compressor é responsável por fazer a sucção do ar atmosférico e comprimi-lo a altas pressões. O ar comprimido entra na câmara de combustão, onde é misturado ao combustível criando condições para que ocorra a combustão. A combustão completa tem como resultado uma violenta expansão dos gases

devido às altas temperaturas atingidas durante o processo. Os gases provenientes da combustão se expandem através da turbina, acionando um gerador elétrico. Os gases liberados pela exaustão da turbina do ciclo Brayton ainda apresentam temperatura relativamente alta, com alto grau de entalpia, condição que permite sua utilização para troca de calor no ciclo Rankine. No ciclo Rankine, é utilizado o calor proveniente da queima de combustíveis para geração de vapor, que pode ser utilizada na geração de energia elétrica em um gerador acionado por uma turbina a vapor.

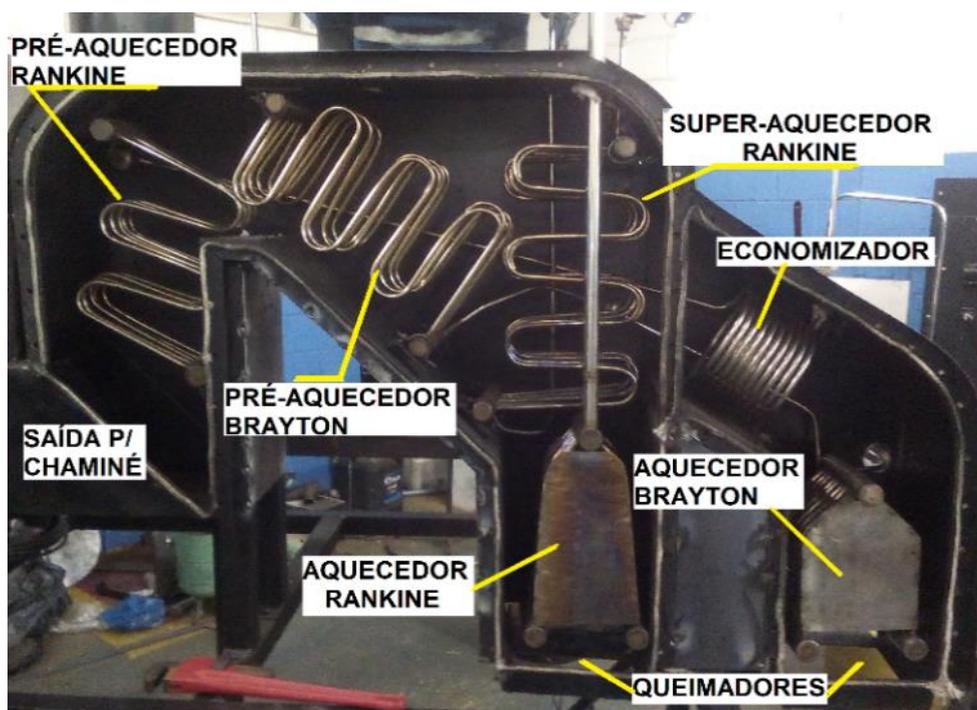


FIGURA 5 – Parte interna do protótipo.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

A figura 6 mostra o fluxo do ar pressurizado através do arranjo de serpentinas que formam o ciclo Brayton no protótipo desenvolvido. O ar pressurizado fornecido por um compressor entra na câmara de combustão passando primeiramente por um conjunto de serpentinas, onde é pré-aquecido através da troca de calor com os gases de combustão que se direcionam para a chaminé. Em seguida o ar passa pelo aquecedor, onde recebe calor diretamente da chama de um queimador, estando em condições de ser injetado em uma turbina a gás.

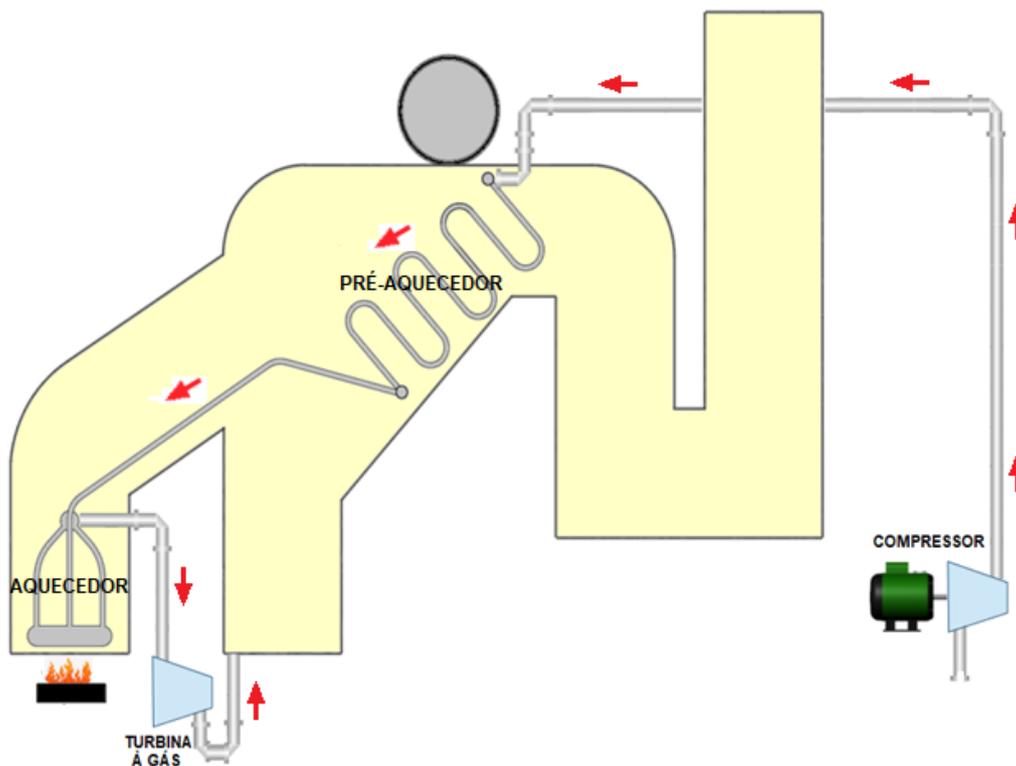


FIGURA 6 – Fluxo através das serpentinas do Ciclo Brayton no protótipo.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

A figura 7 apresenta o fluxo de água e vapor no ciclo Rankine do protótipo desenvolvido. Do tanque reservatório a água é bombeada e entra na câmara de combustão passando primeiramente por um conjunto de serpentinas, onde é pré-aquecida através da troca de calor com os gases de combustão que se direcionam para a chaminé, em seguida essa água passa por um arranjo em espiral denominado economizador, onde recebe calor dos gases de combustão vindos do queimador do Brayton e em seguida entra no vaso de pressão. Do vaso de pressão a água desce até o aquecedor e recebe calor diretamente da chama de um queimador, o vapor gerado sobe para o vaso de pressão. Esse vapor saturado então passa por um arranjo de serpentinas denominado super-aquecedor, por onde aumenta sua temperatura e reduz a umidade, tornando-se um vapor super-aquecido, característica que lhe dá condições de ser injetado em uma turbina a vapor.

O desempenho eficiente da planta didática de geração de potência depende de um controle eficaz dos valores de temperatura e pressão em todos os estágios de cada ciclo. Portanto, é primordial a instalação de sensores nesses pontos tão bem como a realização de seu monitoramento.

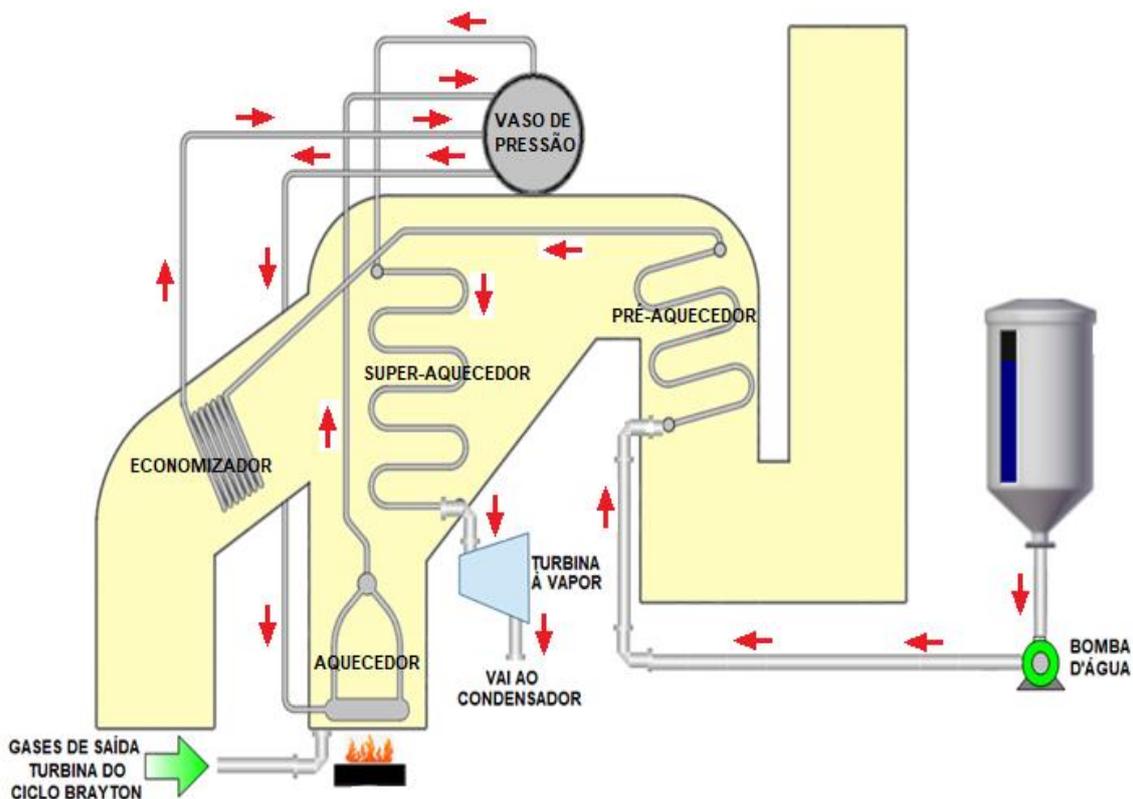


FIGURA 7 – Fluxo através das serpentinas do Ciclo Rankine no protótipo.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.2 Descrição Física

O desenvolvimento do sistema supervisor para monitoramento e interação do operador com a planta de potência tornou-se possível a partir da presença de alguns elementos sensores e atuadores instalados no processo, conectadas em algumas placas microcontroladas para processamento e transmissão dos sinais obtidos.

Como ilustra a figura 8 os elementos sensores recebem sinais indicando as grandezas físicas do processo (variação de temperatura, pressão, vazão etc.) e as convertem em sinais elétricos para serem processados pelas placas microcontroladas, nas quais são previamente inseridos programas de controle. Os elementos atuadores (válvula, motor, bomba etc.) recebem sinais elétricos das saídas das placas microcontroladas para serem ligados ou desligados, o que conseqüentemente modifica diretamente os valores das variáveis do processo manipulado. As placas microcontroladas são conectadas à um sistema supervisor central, o qual gerencia as diversas informações (alarmes, receitas e relatórios) do meio controlado e permite o operador avaliar e interagir com o processo.

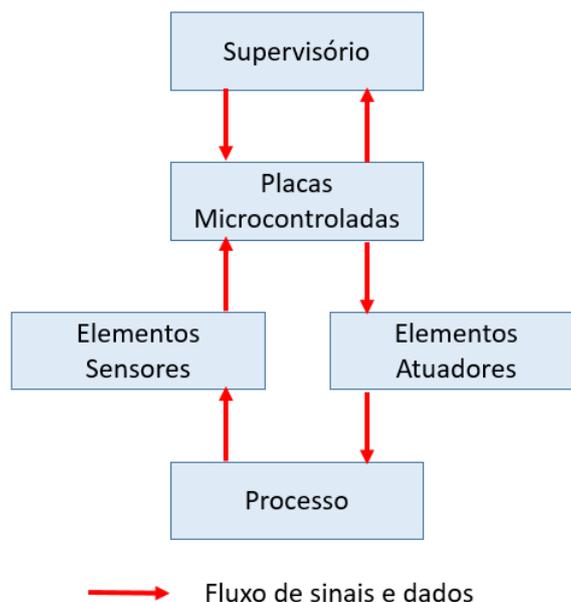


FIGURA 8 – Fluxograma de sinais e dados.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.3 Elementos sensores

Na planta de geração de potência, foram instalados os seguintes elementos sensores conectados aos Arduinos: 12 termopares tipo K com módulo MAX6675, 1 transdutor piezoresistivo MPX5700AP, 1 sensor de vazão YF-S201, 2 chaves de nível e 2 módulos com LDR.

#### 3.3.1 Termopar com Módulo MAX6675

O calor é definido como sendo a energia transferida através da fronteira de um sistema numa dada temperatura, a um outro sistema (ou o meio), numa temperatura inferior, em virtude da diferença de temperatura entre dois sistemas. O calor só pode ser identificado quando atravessa a fronteira, assim o calor é um fenômeno transitório (VAN WYLEN ET AL, 1994).

Quase todos os materiais condutores elétricos apresentam uma dependência entre a resistência e a temperatura. Este fenômeno permite seu emprego como sensores. Os fenômenos termoelétricos envolvidos na operação dos termopares compreendem os efeitos Seebeck e Peltier. O efeito Seebeck se produz pelo fato de os elétrons livres de um metal diferirem de um condutor para outro, dependendo da temperatura. Quando dois

condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas se mantêm a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes. O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém em sentido oposto (GONÇALVES, 2003).

Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de ligas metálicas, desde os mais corriqueiros, de uso industrial, até os mais sofisticados, para uso especial ou restritos a laboratórios. A tabela 1 mostra um resumo com a faixa de temperatura de aplicação de cada termopar e a composição de sua liga.

TABELA 1 – Termopares comuns

Termopar	Faixa de utilização	Composição da Liga
T	-200°C 370°C	(+) Cobre 99,9% (-) Constantan – Cu 58% e Ni 42%
J	-40°C 760°C	(+) Ferro 99,5% (-) Constantan – Cu 58% e Ni 42%
E	-200°C 870°C	(+) Chromel – Ni 90% e Cr 10% (-) Constantan – Cu 58% e Ni 42%
K	-200°C 1260°C	(+) Chromel – Ni 90% e Cr 10% (-) Alumel – Ni 95,4%, Mn 1,8%, Si 1,6%, Al 1,2%
S	0°C 1.600°C	(+) Platina 90%, Rhodio 10% (-) Platina 100%
R	0°C 1.600°C	(+) Platina 87%, Rhodio 13% (-) Platina 100%
B	600°C 1700°C	(+) Platina 70%, Rhodio 30% (-) Platina 94%, Rhodio 6%

FONTE: Gonçalves (2003).

O sensor adotado para realizar a medição de temperatura nos pontos escolhidos foi o termopar tipo K. A adoção deste termopar justifica-se por esse sensor ter uma faixa de utilização compatível com os valores de temperatura dos pontos de monitoramento e também pelo fato de que este termopar já possui no mercado um módulo de leitura que realiza sua interface com a plataforma Arduino, módulo que também foi adotado. Ambos dispositivos possuem um baixo custo de aquisição e apresentam uma boa exatidão para a aplicação do projeto conforme teste que será apresentado a seguir.

O termopar tipo K é constituído pela junção de um fio de Chromel (Ni90%; Cr10%) como termo elemento positivo e um fio de Alumel (Ni95%; Mn2%; Si1%; Al2%) como termo elemento negativo presente dentro de uma sonda. A figura 9 mostra a sonda do termopar utilizado. Os terminais negativo e positivo do termopar foram conectados a

um módulo de leitura com um circuito integrado MAX6675 desenvolvido pela *Maxim Integrated*. A figura 10 ilustra o módulo com o MAX6675. O MAX6675 é um conversor AD de 12 bits de resolução, possui um sensor para compensação de junta fria, um controlador digital e a saída dos dados de temperatura já convertidos via protocolo SPI para conexão a qualquer tipo de microcontrolador podendo realizar medições de temperatura entre 0 e 1024°C (MAXIM INTEGRATED, 2002). A figura 11 detalha a pinagem do circuito integrado MAX6675 e a tabela 2 descreve suas funções.



FIGURA 9 – Sonda do termopar K utilizado.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.



FIGURA 10 – Módulo com CI MAX6675.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

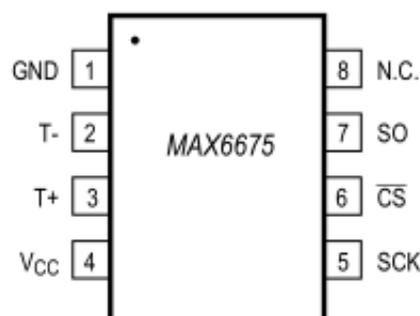


FIGURA 11 – Pinagem do CI MAX6675.  
FONTE: Maxim Integrated, 2002.

TABELA 2 – Descrição dos pinos do MAX6675

PINO	FUNÇÃO
GND	Terra
T-	Conexão ao terminal negativo do termopar K (liga de Alumel)
T+	Conexão ao terminal positivo do termopar K (liga de Chromel)
VCC	Alimentação positiva (5V)
SCK	Entrada para <i>clock</i> serial
CS	Seleção de chip. Configuração baixa habilita a interface serial
SO	Saída de dados serial
N.C.	Sem conexão

FONTE: Maxim Integrated, 2002.

Para medições de temperatura realizadas no intervalo entre 0 e 700°C, o MAX6675 pode apresentar valores de medição com desvio de  $\pm 2,25^\circ\text{C}$  com relação ao valor da temperatura monitorada. Esse valor de desvio é o erro de temperatura admissível do módulo conversor (MAXIM INTEGRATED, 2002).

Para comprovar a veracidade nas medições de temperatura utilizando o termopar tipo K em conjunto com o MAX6675, foi feito um teste utilizando dois termopares: um medindo a temperatura de um ferro de solda ligado e outro medindo a temperatura ambiente dentro do laboratório. Foi utilizado um termômetro com infravermelho Fluke modelo VT02 para acompanhar a variação de temperatura nos mesmos pontos medidos pelos termopares e posteriormente realizar a comparação entre os valores. As figuras 12 e 13 mostram respectivamente as medições feitas com o termômetro com infravermelho e com os dois termopares.



FIGURA 12 – Medição da temperatura com termômetro com infravermelho.

FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

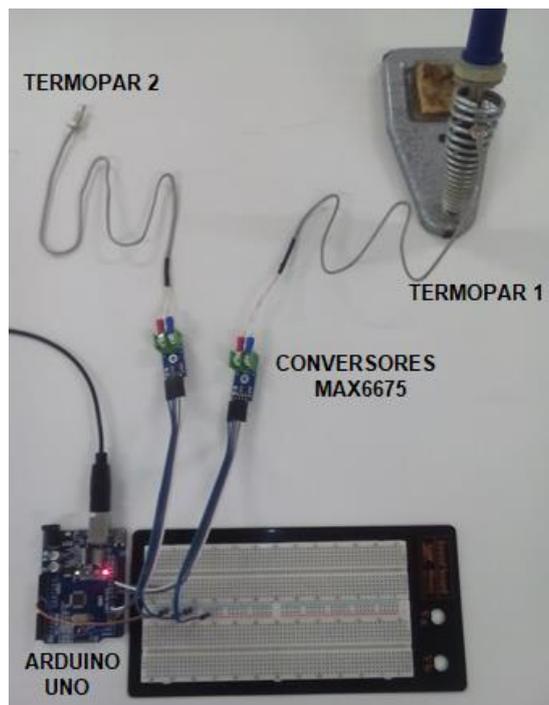


FIGURA 13 – Teste de medição de temperatura com termopares tipo K.  
FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

Os gráficos das figuras 14 e 15 a seguir apresentam um comparativo entre os valores de temperatura obtidos pelos dois termopares e pelo termômetro com infravermelho durante os testes de medições realizados por um período de uma hora. Observando os gráficos nota-se praticamente os mesmos valores de temperatura em todos os instantes de leitura dos equipamentos nas duas medições, o que comprova a veracidade das medições obtidas pelo termopar tipo K em conjunto com o MAX6675.

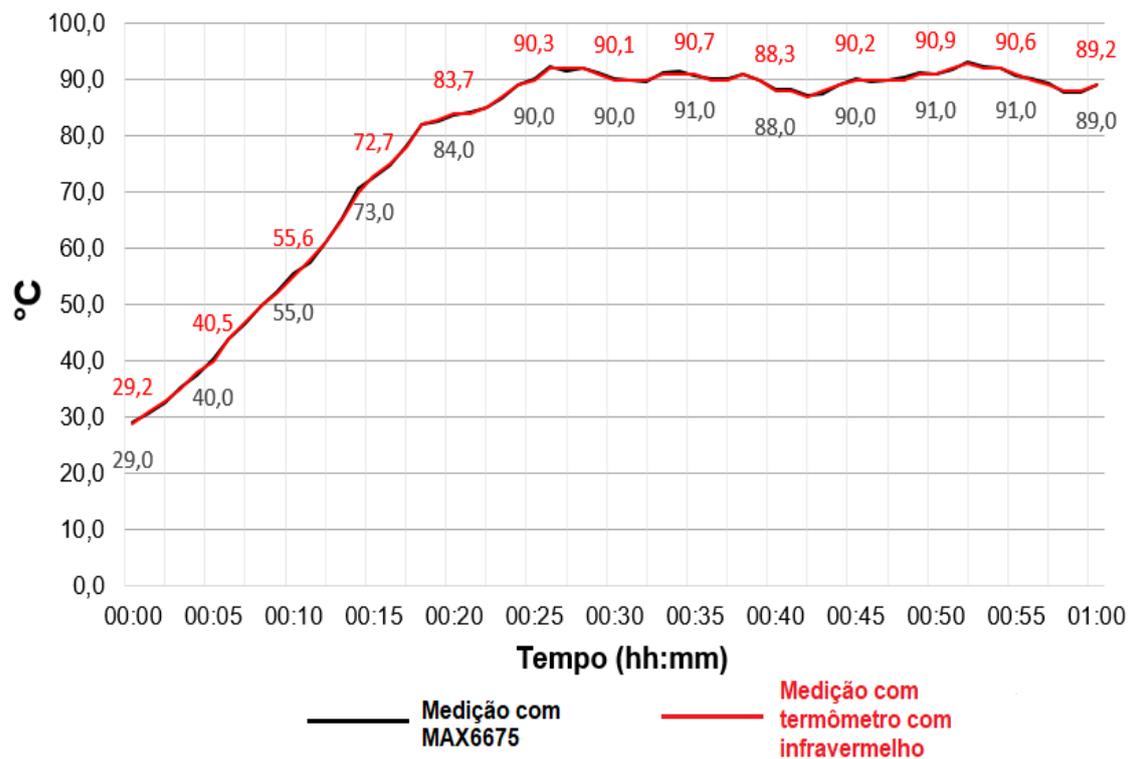


FIGURA 14 – Gráfico com a medição de temperatura de um ferro de solda ligado.  
 FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

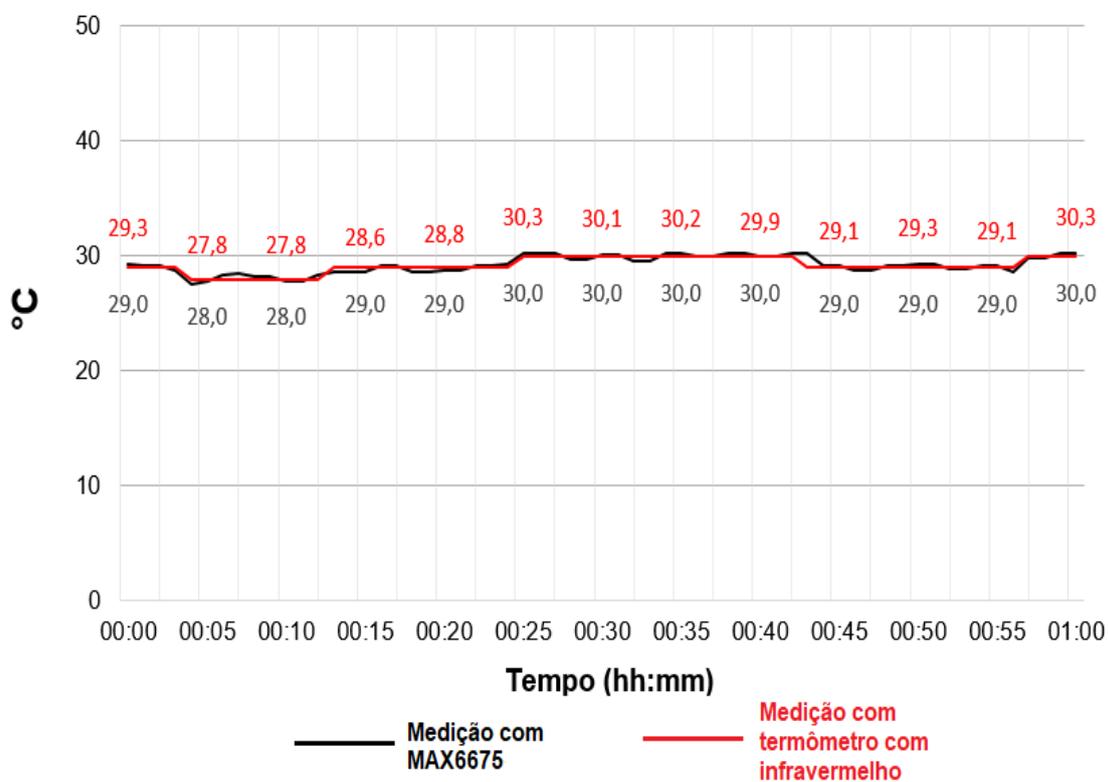


FIGURA 15 – Gráfico com a medição de temperatura ambiente.  
 FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

### 3.3.2 MPX5700AP

A pressão pode ser definida como a componente normal da força por unidade de área. A pressão  $p$  num ponto de um fluido em repouso é a mesma em todas as direções (VAN WYLEN ET AL, 1994).

Os elementos piezoelétricos são cristais, como o quartzo, a turmalina e o titanato, que acumulam cargas elétricas em certas áreas da estrutura cristalina, quando sofrem uma deformação física por ação de uma pressão. São elementos pequenos e de construção robusta, e seu sinal de resposta é linear com a variação de pressão, sendo capazes de fornecer sinais de altíssimas frequências. O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível. Se for conectado a um potencial elétrico, resultará em uma correspondente alteração da forma cristalina. Este efeito é altamente estável e exato, sendo por isso utilizado em relógios de precisão. A carga, devido à alteração da forma, é gerada sem energia auxiliar, uma vez que o quartzo é um elemento transmissor ativo. Esta carga é conectada à entrada de um amplificador e indicada ou convertida em um sinal de saída, para tratamento posterior, como mostra a figura 16. Como vantagem, esse efeito apresenta uma relação linear Pressão x Voltagem produzida e é ideal para locais de frequentes variações de pressão. Sua principal desvantagem é o fato de, em condições estáticas, apresentar redução gradativa de potencial, além de ser sensível à variação de temperatura (GONÇALVES, 2003).

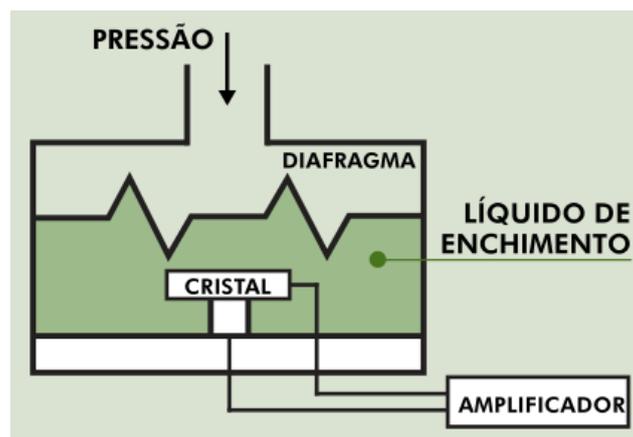


FIGURA 16 – Efeito piezoelétrico.  
FONTE: Gonçalves (2003).

Para se realizar a medição da pressão do ar comprimido que entra no ciclo Brayton, utilizou-se o transdutor piezoresistivo MPX5700AP, desenvolvido pela Freescale *Semiconductor*. A adoção do MPX5700AP justifica-se pelo fato de que esse

transdutor possui uma faixa de trabalho de pressão e temperatura compatível com os valores do ambiente onde será instalado para monitoramento e também por ser compatível com a plataforma Arduino. Este dispositivo apresenta uma boa exatidão nas medições conforme resultado de teste que será detalhado a seguir e encontra-se disponível no mercado à um custo de aquisição reduzido se comparado a outros medidores de pressão.

O MPX5700AP é um sensor de pressão de silício monolítico projetado para aplicações que empregam um microcontrolador ou microprocessador com entradas A/D. Este transdutor de elemento único combina técnicas de micromecanização, metalização de filme fino e processamento bipolar para fornecer um sinal de saída analógico preciso proporcional à pressão aplicada (FREESCALE, 2012). As figuras 17 e 18 detalham respectivamente este sensor, descrevendo sua pinagem e os elementos internos que o constituí.



FIGURA 17 – Sensor MPX5700AP.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

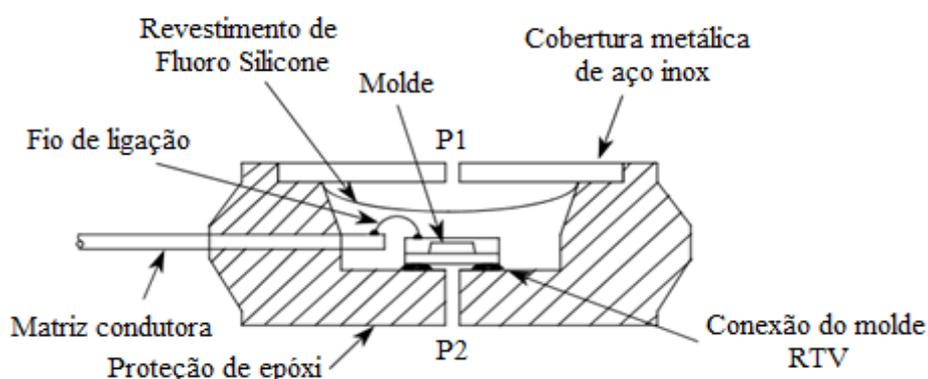


FIGURA 18 – Detalhes internos sensor MPX5700AP.  
FONTE: Freescale, 2012.

O MPX5700AP é um sensor de pressão absoluta com faixa operacional entre 15 e 700 kPa empregado na medição de pressão de ar e gases com temperatura entre  $-40^{\circ}$  e  $125^{\circ}\text{C}$ . Possui 6 pinos para ligação, porém apenas 3 são utilizados nesta aplicação: o pino 1 fornece o sinal de saída analógico (0,2 à 4,7V) e os pinos 2 e 3 são utilizados para energização, conectando-se ao comum e à alimentação positiva (5V) respectivamente (FREESCALE, 2012). Com base na faixa de pressão operacional do sensor e no intervalo de variação do sinal de saída, conclui-se que este sensor possui uma sensibilidade de 6,4mV para cada 1 kPa. A figura 19 apresenta um diagrama de blocos do circuito interno presente neste sensor de pressão. A figura 20 mostra o esquema de ligações entre o sensor MPX5700AP e o Arduino Uno. A transmissão do sinal de saída é feita entre o pino 1 do sensor e a entrada A0 do Arduino, e a energização do MPX5700AP é feita através da ligação dos pinos 2 e 3 do sensor aos bornes GND e 5V do Arduino.

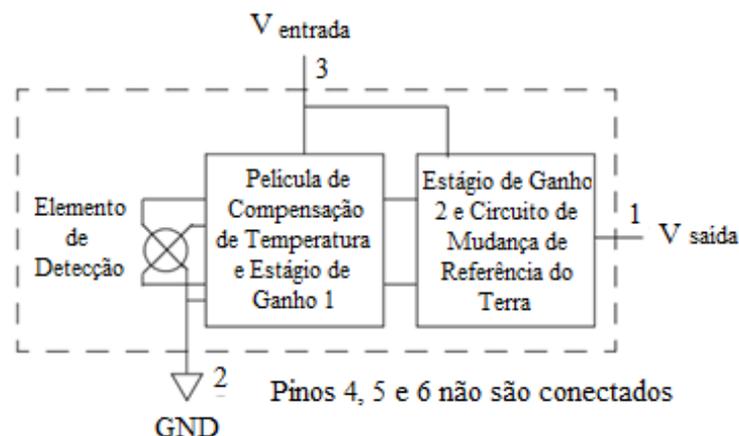


FIGURA 19 – Diagrama de blocos do circuito interno do MPX5700AP.  
FONTE: Adaptado Freescale, 2012.

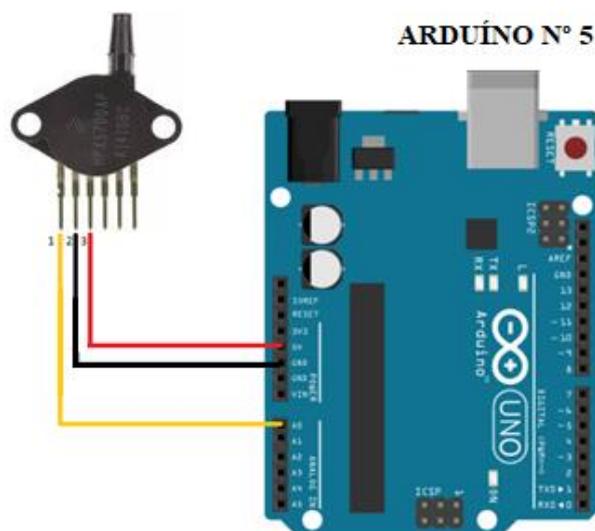


FIGURA 20 – Ligação entre MPX5700AP e Arduino Uno.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

O MPX5700AP possui uma entrada tipo espigão para que possa ser conectado ao meio em que se deseja medir a pressão. Para se medir a pressão do ar comprimido na entrada do ciclo Brayton, o espigão do sensor foi conectado à uma mangueira com 6mm de diâmetro que foi conectada a um espigão de metal fixado à mangueira de 1" por onde chega o fluxo de ar vindo do compressor. A figura 21 detalha as dimensões construtivas do MPX5700AP e a figura 22 o mostra instalado.

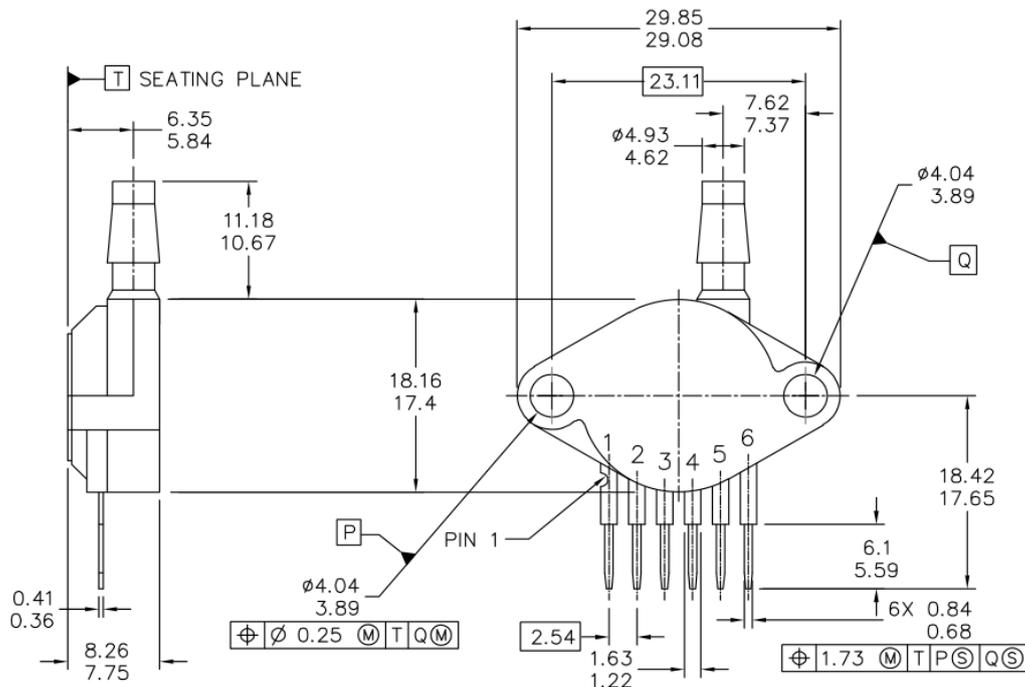


FIGURA 21 – Dimensões construtivas do sensor MPX5700AP.  
FONTE: Freescale, 2012.



FIGURA 22 – Sensor MPX5700AP instalado.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Para medições de ar ou gases com temperatura entre 0 e 85°C, o MPX5700AP pode apresentar valores de medição com desvio de  $\pm 17,125$  kPa com relação à pressão monitorada. Esse valor de desvio corresponde ao erro máximo de  $\pm 2,5\%$  sobre a faixa de medição do transdutor (685 kPa) (FREESCALE, 2012).

Para checar a veracidade nas medições de pressão realizadas pelo MAX5700AP foi feito um teste de bancada com esse transdutor. Foi conectado ao transdutor uma mangueira com suprimento de ar pressurizado com a finalidade de se realizar uma variação de pressão na entrada do sensor através do controle manual da válvula presente em uma unidade de conservação. Foi utilizado um manômetro analógico conectado ao mesmo ponto de suprimento de ar pressurizado para realizar o comparativo com os valores de medição obtidos. A figura 23 mostra a bancada montada para realização do teste.

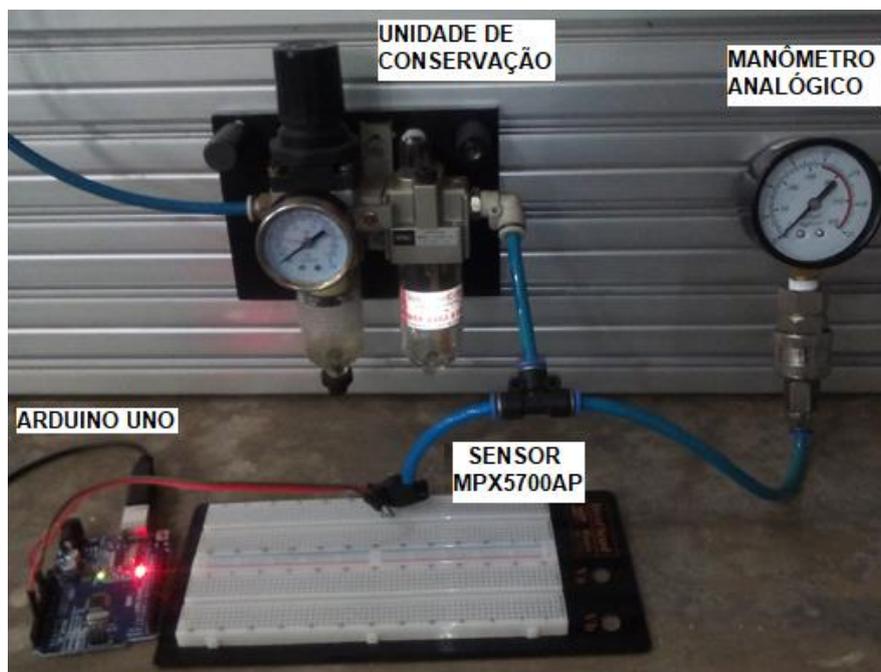


FIGURA 23 – Teste de medição de pressão.  
FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

A figura 24 apresenta o gráfico com os valores de pressão coletados pelo sensor MPX5700AP e os valores visualizados no manômetro analógico em um período de 30 minutos. Ressaltando que ambos instrumentos mediam a variação de pressão em uma linha de ar comprimido controlada manualmente. Observando o gráfico nota-se praticamente os mesmos valores de pressão em todos os instantes de leitura dos instrumentos durante a medição, o que comprova a veracidade das medições obtidas pelo transdutor MPX5700AP.

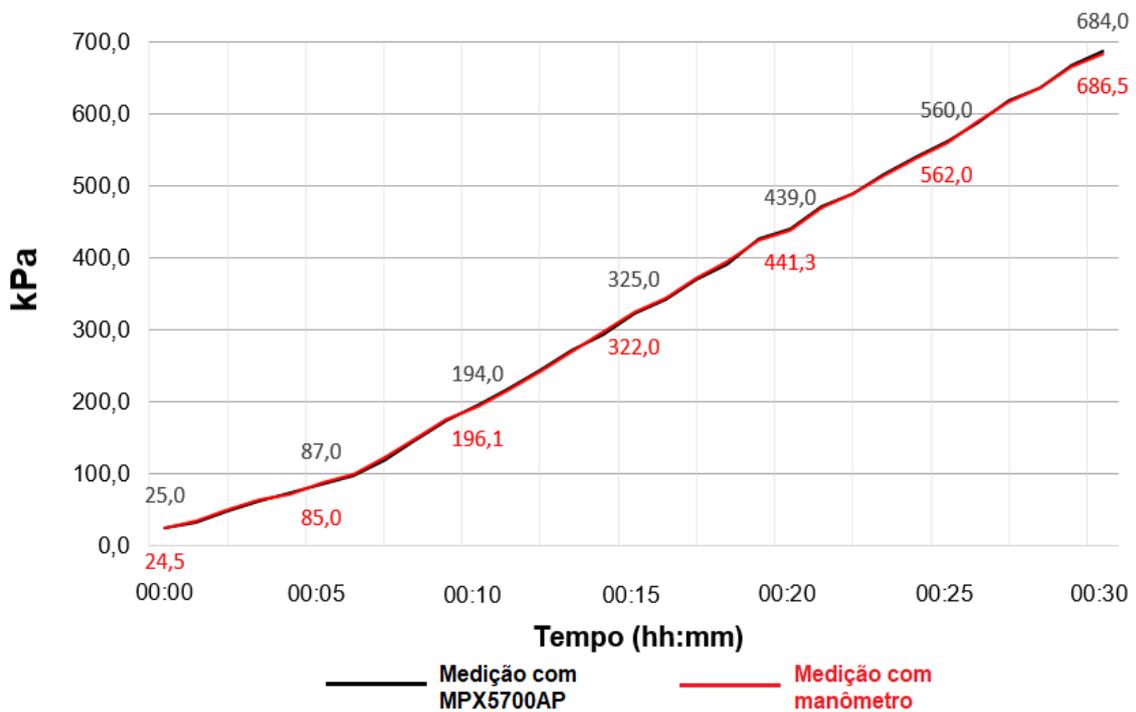


FIGURA 24 – Gráfico com a medição de pressão de uma linha de ar comprimido.  
 FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2018.

### 3.3.3 Chave de nível

Para fornecer água ao ciclo Rankine foi montado junto à planta um tanque reservatório com capacidade para armazenar aproximadamente 30 litros de água. A figura 25 mostra o tanque reservatório da planta.



FIGURA 25 – Tanque reservatório de água.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Para se manter o controle do nível de água no reservatório, foram empregadas duas chaves tipo boia presas ao casco do tanque, posicionadas onde o nível de água atingiria aproximadamente 70% e 90% do total. A figura 26 apresenta a chave de nível utilizada e a figura 27 mostra suas dimensões construtivas. A adoção de chaves de nível tipo boia é justificada pelo fato de que o processo necessita apenas que o tanque se mantenha em um nível próximo ao máximo e, portanto dispensa um acompanhamento do nível exato de água existente no reservatório. Deve-se ressaltar que é um dispositivo que apresenta praticidade de instalação, não requerendo configurações ou calibrações complexas e também por apresentar um baixo custo de aquisição.

Essa chave é formada por um eixo vertical que faz a função de um curso para uma boia movimentar conforme a variação do nível do meio a ser medido. À medida que o nível de água aumenta, a boia chega ao ponto máximo do seu curso. Quando isso ocorre, o ímã interno da boia aciona um contato tipo *reed switch* presente no interior do eixo nessa região e então o dispositivo passa a funcionar como uma chave fechada. A figura 28 ilustra o modo de acionamento desse dispositivo.



FIGURA 26 – Chave de nível.  
FONTE: O autor (2018).

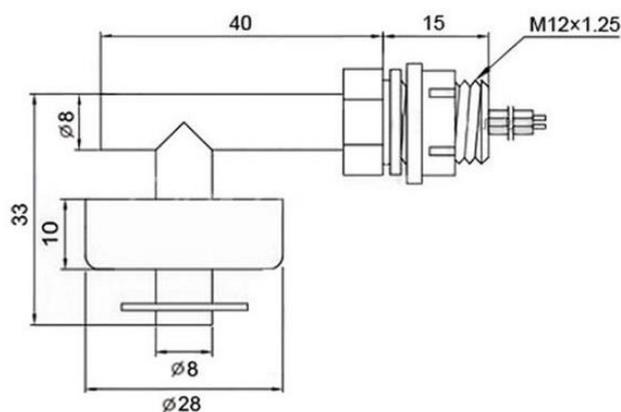


FIGURA 27 – Dimensões construtivas da chave de nível.  
FONTE: Eletrogate, 2019.



Rankine, foi instalado, após a bomba d'água, um sensor de vazão modelo YF-S201 com capacidade de leitura de fluxo de até 30 litros por minuto. A figura 30 mostra o sensor YF-S201.

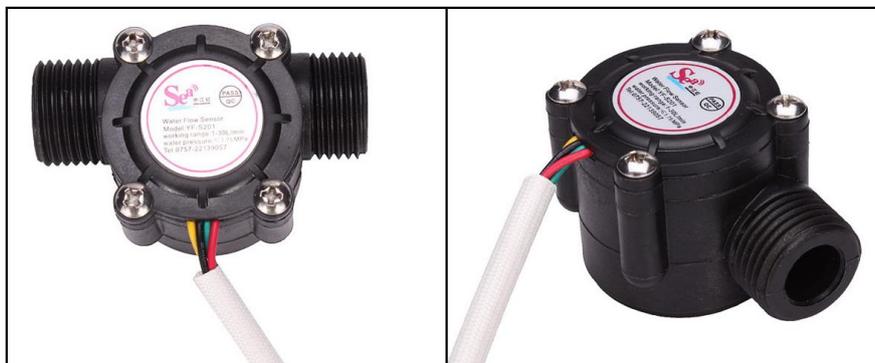


FIGURA 30 – Sensor de vazão YF-S201.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Este sensor de fluxo trabalha como uma turbina, ou seja, em seu interior existe uma pequena hélice que ao entrar em atrito com a água transmite o movimento rotacional a um ímã acoplado. Paralelo ao ímã, há um sensor de efeito Hall que detecta cada volta dada pelo ímã. Quando a água passa pelo rotor, são gerados pulsos proporcionais à velocidade do rotor (STEVAN JR.; SILVA, 2015). A figura 31 ilustra o interior do sensor YF-S201.



FIGURA 31 – Interior do sensor de vazão YF-S201.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

A figura 32 detalha as dimensões construtivas do YF-S201 e a figura 33 mostra este sensor instalado na tubulação que faz a ligação entre o tanque reservatório e o trocador de calor.

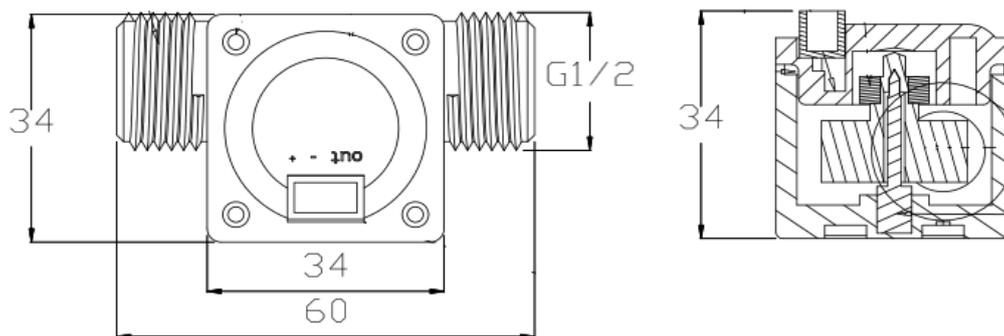


FIGURA 32 – Dimensões construtivas do sensor YF-S201.  
 FONTE: Datasheet YF-S201B (2012).



FIGURA 33 – Sensor YF-S201 instalado.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

A tensão de operação do YF-S201 é de 5 a 24 VCC, sendo a tensão nominal de 5 VCC. Esse sensor possui três fios para conexão: vermelho (5V), preto (GND) e amarelo (sinal de saída). Quando alimentado a 5V, os pulsos de saída são de 4,5V quando em nível alto e de 0,5V quando em nível baixo. As figuras 34 e 35 detalham respectivamente os fios de conexão do YF-S201 e o esquema de ligação do dispositivo ao Arduino, mostrando o sinal de saída do sensor ligado ao pino 9 (entrada/saída digital).

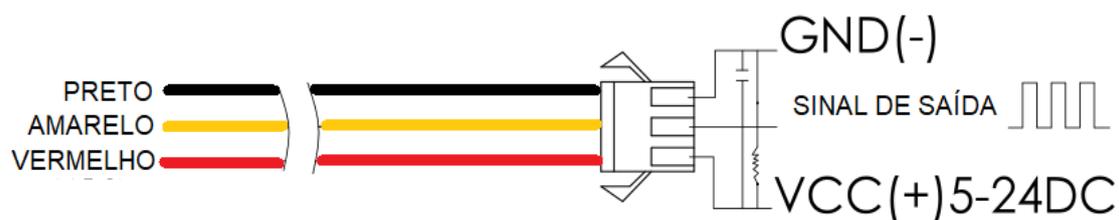


FIGURA 34 – Fios de conexão do sensor YF-S201.  
 FONTE: Datasheet YF-S201B (2012).

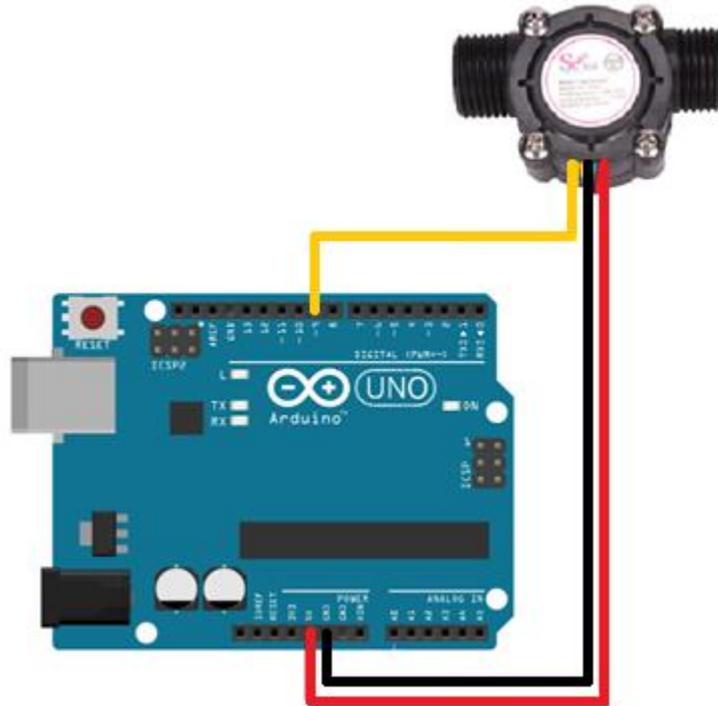


FIGURA 35 – Esquema de ligação entre sensor de vazão YF-S201 e Arduino Uno.  
FONTE: O autor (2018).

### 3.3.5 Módulo com LDR

Durante a operação da planta de geração de potência existe a possibilidade das chamas dos queimadores apagarem em determinado momento. Se esse fato vier a ocorrer e a válvula de gás permanecer aberta, há o risco de acontecer uma explosão no ambiente onde o gás vier a se acumular. Diante dessa possibilidade, estudou-se instalar um módulo com LDR próximo a cada queimador para realizar o monitoramento das chamas. O LDR (*light dependent resistor*) é um sensor resistivo que tem sua resistência dependente da incidência de luz, conhecido como fotorresistor. Optou-se por utilizar módulos com LDR pois esse sensor possui uma técnica de detecção prática que não requer contato direto com as chamas, ao mesmo tempo confiável pois seu acionamento ocorre através da detecção de luminosidade, um método bastante utilizado na indústria. O módulo LDR também apresenta como vantagens a compatibilidade com a plataforma Arduino, a facilidade de instalação e a disponibilidade no mercado à um custo acessível.

O LDR tem uma face circular com material semicondutor (usualmente sulfeto de cádmio ou sulfeto de chumbo) conforme mostra a figura 36. Tipicamente, apresenta resistência muito alta (na ordem de dezenas a centenas de  $k\Omega$ ), na falta de luz. Quando há iluminação em sua face, sua resistência cai drasticamente para a ordem de centenas de

$\Omega$ , caracterizando seu comportamento inversamente proporcional entre resistência e iluminação (STEVAN JR.; SILVA, 2015).

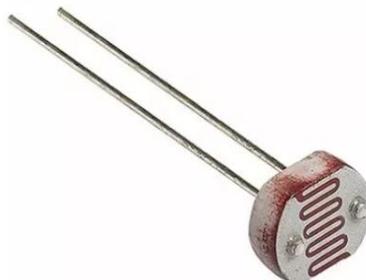


FIGURA 36 – Sensor LDR.  
FONTE: O autor (2018)

O módulo é formado basicamente pelo elemento sensor LDR, um potenciômetro de ajuste de sensibilidade e um amplificador operacional LM393, além de possuir três pinos de ligação: 5V, GND e saída digital como mostra a figura 37. Quando a intensidade de luz está abaixo do valor ajustado, a saída digital do módulo fica em estado alto, e quando a intensidade de luz ultrapassa a faixa, a saída fica em estado baixo. Este valor pode ser ajustado através do potenciômetro presente no módulo que regula a saída digital (STEVAN JR.; SILVA, 2015). A figura 38 mostra as ligações entre os módulos e o Arduino.

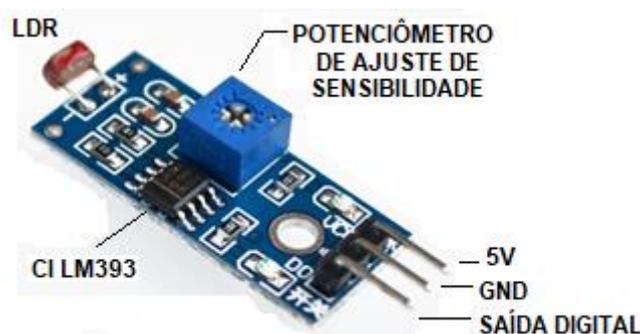


FIGURA 37 – Módulo com Sensor LDR.  
FONTE: O autor (2018).

O potenciômetro de ajuste de sensibilidade do módulo LDR possui uma resistência de 10 k $\Omega$ . Foi feito teste de variação da resistência do potenciômetro junto à chama para encontrar o valor necessário para que ocorresse a detecção da luminosidade. Durante o teste verificou-se que variando o potenciômetro de 0 à 10 k $\Omega$ , o módulo passa

a detectar a luminosidade da chama de maneira estável a partir de 3,3 k $\Omega$ . Para manter uma margem de segurança, os dois potenciômetros foram ajustados com 4 k $\Omega$ .

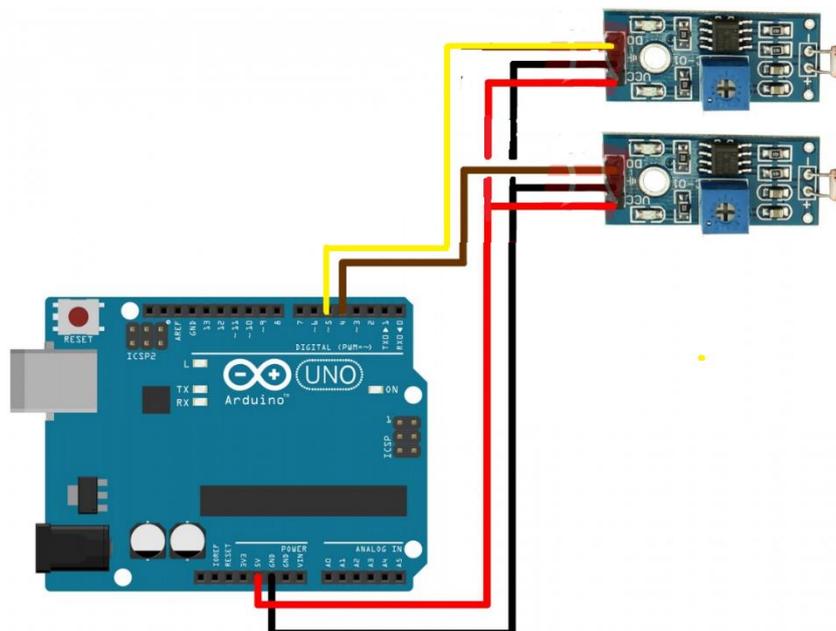


FIGURA 38 – Esquema de ligação entre módulos LDR e Arduino Uno.  
FONTE: O autor (2018).

A figura 39 mostra o módulo com o sensor LDR instalado na entrada de acesso ao queimador de modo que pudesse captar a luminosidade da chama e também fosse acessível ao operador para que se realize o ajuste de sensibilidade no potenciômetro quando houver necessidade.



FIGURA 39 – Módulo LDR instalado próximo ao queimador.  
FONTE: O autor (2018).

### 3.4 Elementos atuadores

O funcionamento do ciclo combinado Brayton-Rankine depende dos seguintes atuadores controlados: uma válvula *on/off* para gás GLP, uma usina ignitora, um compressor de ar e uma bomba d'água.

#### 3.4.1 Válvula de água

Para controlar a entrada de água no tanque reservatório da planta, foi utilizada uma válvula solenoide, dispositivo geralmente usado em máquinas de lavar roupas, como mostra a figura 40. Sua abertura acontece quando se energiza com 12VCC a solenoide nela existente.



FIGURA 40 – Válvula de água.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

#### 3.4.2 Válvula de gás GLP

O dispositivo usado para permitir a passagem de gás combustível do botijão para os queimadores é uma válvula do tipo agulha, com seu corpo construído em latão forjado, modelo geralmente usado em fornos de padaria. Sua abertura ocorre quando a solenoide nela existente é energizada com 12VCC. A figura 41 mostra a válvula utilizada.



FIGURA 41 – Válvula de gás.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.3 Usina ignitora e eletrodo centelhador

A ignição para acendimento dos queimadores é feita através de eletrodos centelhadores que recebem um arco elétrico de 16kV gerado por uma usina ignitora quando esta é energizada com 220VCA. Estes equipamentos são os mesmos utilizados em fogões e fornos de cozinha. As figuras 42 e 43 mostram o eletrodo centelhador e a usina ignitora utilizada.



FIGURA 42 – Eletrodo centelhador.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.



FIGURA 43 – Usina ignitora.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.4 Compressor elétrico

Para fornecer o ar comprimido necessário ao funcionamento do ciclo Brayton, foi utilizado um compressor elétrico marca DeWalt, modelo D55955F. Esse compressor é do tipo pistão, tem uma potência de 3,75kW e capacidade de fornecimento de 707,5 l/min à uma pressão de 175 PSI. As figuras 44 e 45 mostram o compressor utilizado e sua placa de identificação com seus dados de funcionamento.



FIGURA 44 – Compressor elétrico de pistão.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

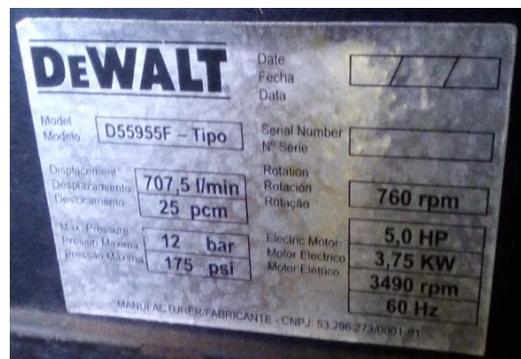


FIGURA 45 – Placa de identificação do compressor elétrico.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.5 Bomba elétrica

Para transferir a água do tanque reservatório para o trocador de calor, para iniciar o funcionamento do ciclo Rankine, foi utilizada uma bomba elétrica da marca Singflo, modelo FL-200. Essa bomba é do tipo diafragma com capacidade de fornecimento de 10 l/min à uma pressão de 200PSI. O uso desse equipamento é muito comum em embarcações para transporte de água para serviço e consumo. Seu acionamento ocorre quando seu motor

estiver energizado com 12VCC. As figuras 46 e 47 mostram a bomba e sua placa de identificação com seus dados de funcionamento.



FIGURA 46 – Bomba de diafragma.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.



FIGURA 47 – Placa de identificação da bomba d'água.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.6 Placas microcontroladas Arduino Uno

Microcontrolador é um componente responsável por receber um sinal eletrônico já adequado por um circuito intermediário de condicionamento de sinais, e enquadrá-lo sob uma lógica de controle. Em função dessa lógica e dos níveis dos sinais de entrada, o sistema interage com atuadores que interferem no sistema, seja para informar, seja para efetivamente interagir com o sistema (STEVAN JR.; SILVA, 2015).

Arduino é uma plataforma *open source*, ou software livre baseado nas linhas de microcontroladores da ATMEL, disponíveis em diferentes versões no mercado. O Arduino Uno é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328 de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada, que pode ser encontrado em encapsulamento DIP28 ou SMD (STEVAN JR.; SILVA, 2015). As principais características do Arduino Uno são mostradas na tabela 3 e a figura 48 ilustra essa placa.

TABELA 3 – Principais Especificações do Arduino Uno

MICROCONTROLADOR	ATMEGA328
Tensão de funcionamento	5V
Tensão de entrada fonte externa (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Digital pinos de I/O	14(dos quais 6 fornecem uma saída de PWM)
Entrada Analógica	6
Corrente DC para pinos I/O	40 mA
Corrente DC para pino 3,3V	50 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega 328), dos quais 0,5 KB utilizado pelo bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidade de clock	16 MHz

FONTE: Stevan Jr. e Silva, 2015.

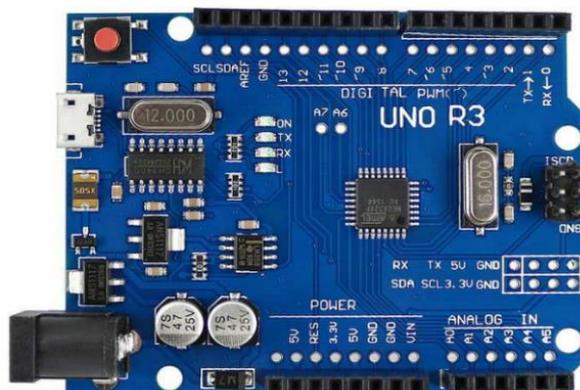


FIGURA 48 – Placa Arduino Uno.

FONTE: Eletrogate, 2019.

Para operar a planta didática de geração de potência foram utilizados cinco Arduinos Uno conectados, comunicando-se entre si e o supervisor. Quatro Arduinos foram programados para receber e processar os sinais gerados pelos sensores presentes na planta e transmiti-los ao supervisor e um Arduino foi programado para tomar decisões e enviar sinais de acionamento para os atuadores.

### 3.4.7 IDE do Arduino

O *software* IDE Arduino é, em primeira instância, uma ferramenta de edição de linguagem de alto nível C++; mas, em uma segunda instância, é o que compila o código nessa linguagem e o converte para Assembly, para que ele possa converter em código binário e embarcar o código no Arduino (STEVAN JR.; SILVA, 2015). Para desenvolver os códigos de programação do projeto, foi utilizada a versão 1.8.2 do IDE Arduino, disponível para *download* e instalação no endereço eletrônico (<<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>).

O IDE Arduino é dividido em três partes: a *Toolbar* no topo, o código ou a *Sketch Window* no centro, e a janela de mensagens na base. A *Toolbar* consiste de seis botões. Sob a *Toolbar*, há uma guia, ou um conjunto de guias, com o nome do arquivo do *sketch*. Ao longo do topo, há a barra de menus, com os itens Arquivo, Editar, *Sketch*, Ferramentas e Ajuda. Os botões na *Toolbar* fornecem acesso conveniente às funções mais utilizadas dentro desses menus (MC ROBERTS, 2011). A figura 49 mostra a IDE Arduino utilizada.

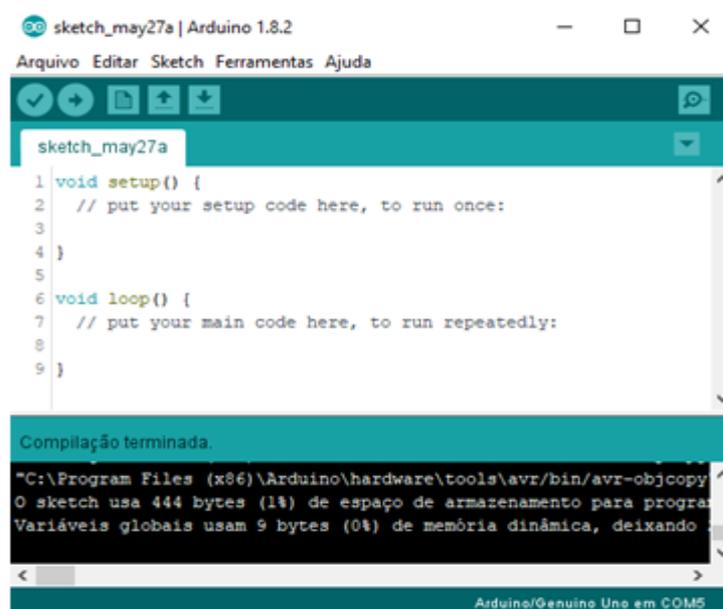


FIGURA 49 – IDE Arduino versão 1.8.2.  
FONTE: Eletrogate, 2019.

O arquivo em que é programado o código em linguagem C é conhecido como *sketch*. Basicamente, a estrutura de um *sketch* é formada por três blocos: o bloco de declaração de variáveis; o bloco da função *setup* ( ), com declarações, inicializações e funções internas que serão executadas uma única vez, e o bloco da função *loop* ( ), com funções que se repetirão (STEVAN JR.; SILVA, 2015).

### 3.4.8 Módulo Relé

O acionamento de alguns atuadores (bomba d'água, válvula de água, usina de ignição e válvula de gás) é realizado através da comutação de relés presentes em um módulo eletrônico com 4 relés. A figura 50 mostra o modelo do módulo relé utilizado. Este módulo é conectado diretamente a 4 saídas digitais do Arduino número 5 do projeto como mostra o esquema de ligação na figura 51. Ao receber um sinal baixo da saída digital, o relé correspondente fecha contato, permitindo a energização do atuador conectado a ele. A figura 52 mostra o painel onde o módulo relé foi acomodado e detalha suas conexões realizadas com os atuadores.



FIGURA 50 – Módulo com 4 relés.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

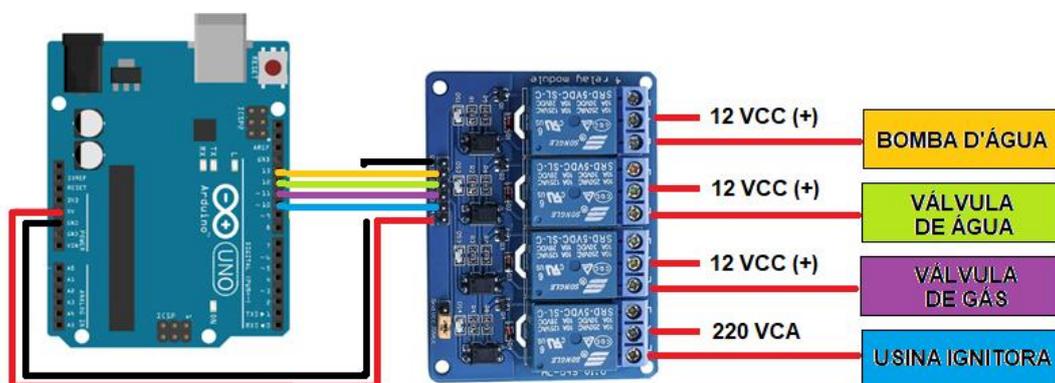


FIGURA 51 – Esquemático com as ligações ao módulo relé.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

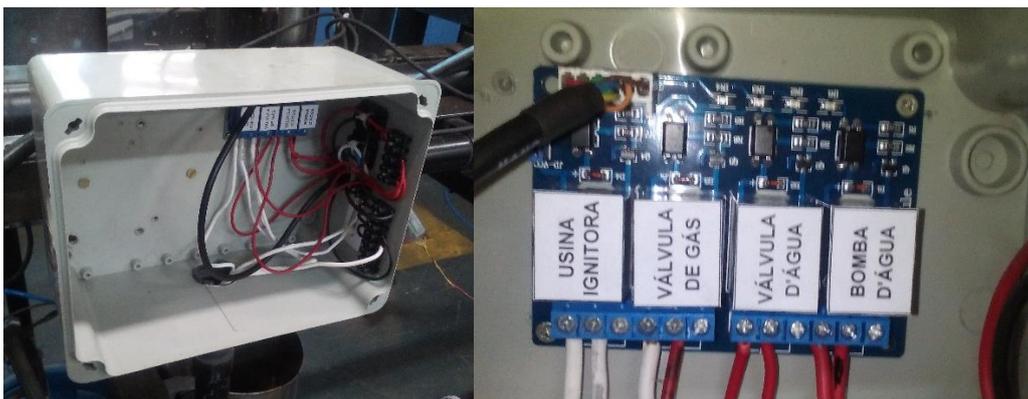


FIGURA 52 – Painel com módulo com 4 relés.

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.9 Comunicação Modbus

Para se estabelecer a comunicação entre as placas microcontroladas e o supervisor foi utilizado o protocolo de comunicação Modbus padrão RS485. A escolha desse padrão de comunicação é justificada pelo fato do Modbus ser um protocolo aberto, bastante conhecido no meio industrial e acadêmico, por permitir uma interação multiponto de maneira prática e por ser acessível à plataforma Arduino com os adaptadores disponíveis no mercado.

O Modbus é um protocolo da camada de aplicação para comunicação entre dispositivos em sistemas de automação industrial. Desenvolvido em 1979 pela Modicon *Industrial Automation Systems*, hoje Schneider, atualmente é utilizado por vários fabricantes em diversos equipamentos (SOUZA, 1999). O Modbus é um protocolo de requisição-resposta que utiliza um relacionamento mestre-escravo, no qual a comunicação sempre ocorre em pares — um dispositivo deve iniciar a requisição e então aguardar por uma resposta — e o dispositivo iniciador (o mestre) é responsável por iniciar cada interação. A figura 53 ilustra o ciclo pergunta-resposta no protocolo Modbus. Tipicamente, o mestre é uma interface homem-máquina (IHM) ou sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e o escravo é um sensor, controlador lógico programável (CLP) ou controlador programável para automação (CPA) (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

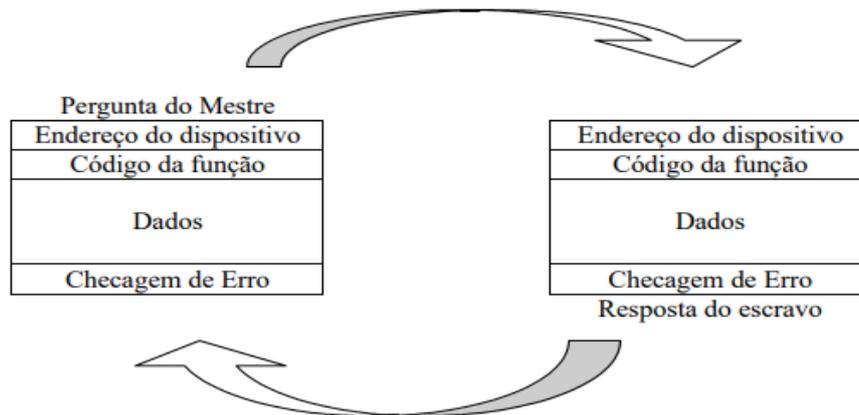


FIGURA 53 – Ciclo pergunta-resposta.  
FONTE: Souza, 1999.

A comunicação é baseada em um pacote, denominado PDU (*Protocol Data Unit*) que é definido pela especificação do protocolo em três tipos (WEG, 2013):

PDU de requisição:

- *Function Code*: código que especifica o tipo de serviço ou função solicitada (1 *byte*)
- *Function Data*: dados específicos da função (número de *bytes* variável)

PDU de resposta:

- *Function Code*: código da função correspondente à requisição (1 *byte*)
- *Response Data*: dados específicos da função (número de *bytes* variável)

PDU de resposta com exceção:

- *Error Code*: código da função correspondente à requisição com o *bit* mais significativo em 1 (1 *byte*)
- *Exception Code*: código especificando a exceção (1 *byte*)

O protocolo Modbus pode ser utilizado em diversos padrões de meio físico, como RS-232, RS-485 e Ethernet TCP/IP (MODICON, 1996). Para a comunicação entre os dispositivos utilizados no presente projeto, foi adotado o padrão RS-485, um sistema multiponto que permite que vários dispositivos possam ser ligados ao mesmo barramento de comunicação. A figura 54 exemplifica um barramento que utiliza o padrão RS-485 a dois fios.

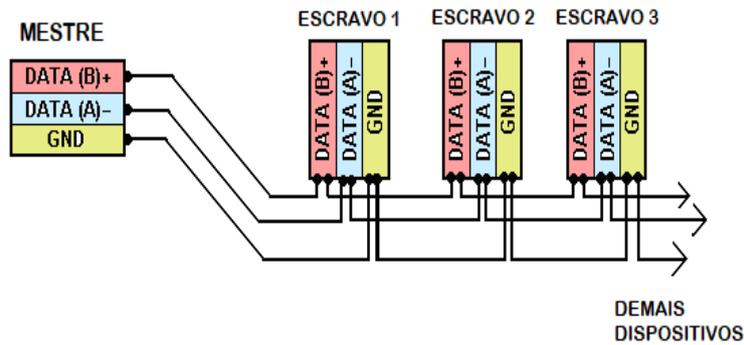


FIGURA 54 – Barramento Modbus RS-485 à dois fios.  
FONTE: B&B Eletronics, 2003.

Sua implementação pode ser feita através de dois modos de transmissão em ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) ou RTU (*Remote Terminal Unit*) (MODICON, 1996). Para o projeto, foi selecionado o modo de transmissão RTU, geralmente mais utilizado em automação industrial, no qual cada *byte* de mensagem é enviado como um *byte* de dados. A mensagem deve ser transmitida de maneira contínua, pois pausas maiores que 1,5 caractere provocam truncamento da mesma. A tabela 4 mostra o formato de uma mensagem no modo de transmissão RTU.

TABELA 4 – Formato da mensagem no modo de transmissão RTU

<i>Start</i>	Endereço	Função	Dados	CRC	<i>End</i>
Silêncio 3..5 chars	← 8 bits →	← 8 bits →	← N x 8 bits →	← 16 bits →	Silêncio 3..5 chars

FONTE: Souza, 1999.

### 3.4.10 Módulo MAX485

Para se estabelecer a comunicação entre os cinco Arduinos e o supervisor, empregou-se um módulo adaptador com chip MAX485 conectado em cada placa microcontrolada com a finalidade de converter o sinal TTL fornecido pelo Arduino em sinal padrão RS485 (EIA/TIA485). A figura 55 apresenta o módulo MAX485 utilizado.

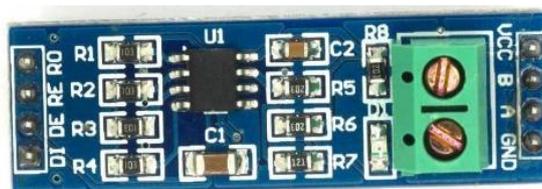


FIGURA 55 – Módulo com chip MAX485.  
FONTE: Eletrogate, 2019.

O chip MAX485 desenvolvido pela *Maxim Integrated* é um transceptor de baixa potência que trabalha alimentado por uma única fonte de 5V e apresenta uma corrente de consumo de 300  $\mu\text{A}$ , podendo atingir uma taxa de transmissão máxima de 2.5Mbps. Para que se inicie a comunicação entre os dispositivos, os terminais DI e RO dos módulos MAX485 devem estar conectados respectivamente aos pinos TX e RX de cada Arduino e os terminais DE e RE do módulo devem ser conectados juntos em uma saída digital do Arduino, como mostra a figura 56. A variação de polaridade desta saída digital define a função do MAX485 durante a comunicação, trabalhando ora como transmissor (5V), ora como receptor (0V) (MAXIM INTEGRATED, 2014). A figura 57 detalha a pinagem do chip MAX485.

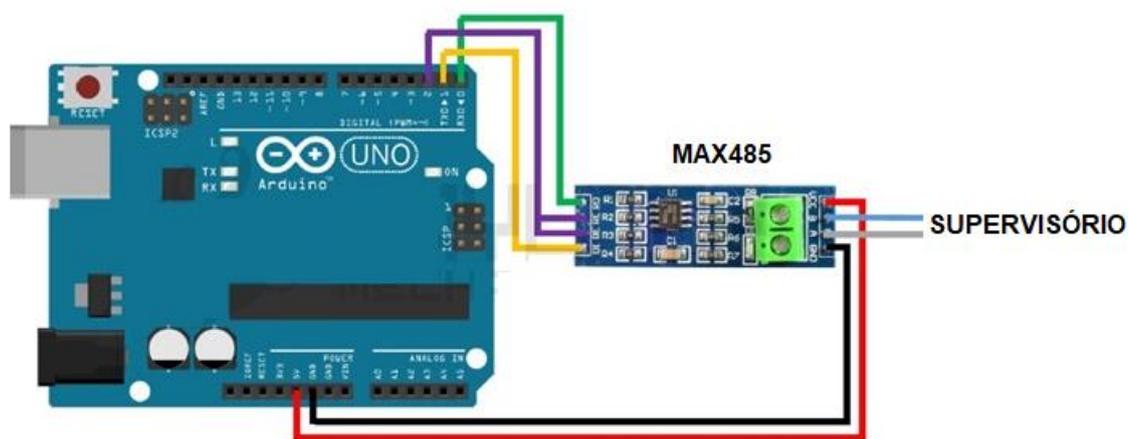


FIGURA 56 – Ligação do Arduino ao conversor MAX485.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

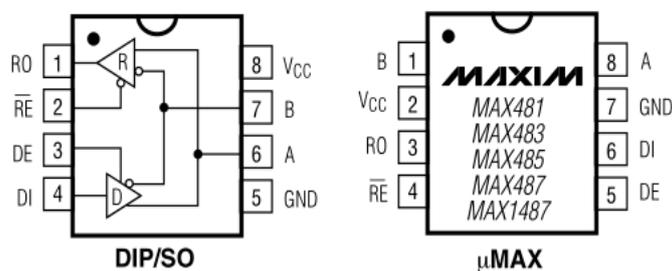


FIGURA 57 – Chip MAX485.  
FONTE: Maxim Integrated, 2014.

Os terminais A e B de cada módulo MAX485 são conectados entre si formando um barramento A e um barramento B, como ilustra a figura 59. Para que o computador no qual está instalado o programa supervisorio possa comunicar com esse barramento, é

necessário utilizar um conversor RS485/USB. Esse conversor possui dois *bornes* para a ligação dos barramentos A e B e do lado oposto um conector USB para ser conectado em uma porta COM do computador. A figura 58 mostra o conversor RS485/USB utilizado.



FIGURA 58 – Conversor RS485 - USB.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

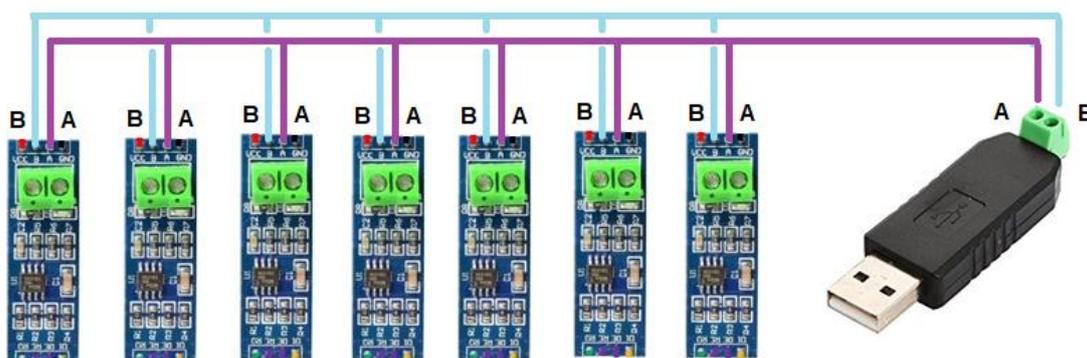


FIGURA 59 – Esquema de comunicação Modbus RS485.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.11 PCIs Desenvolvidas

Para uma maior praticidade nas ligações entre os Arduinos, os módulos MAX485, sensores e módulo relé dos atuadores, e também, para evitar mau contato que pudesse vir a causar interferência, tanto na transmissão de sinais dos medidores, como na comunicação de dados, foi confeccionada uma placa de circuito impresso (PCI) para cada Arduino com trilhas fazendo essas interligações. Para fixação dos dispositivos eletrônicos na PCI foram soldados barras de pino macho para encaixe do Arduino, barras de pino fêmea para conexão do módulo MAX485 e conectores molex macho para encaixe dos conectores fêmea presente nos cabos dos sensores e atuadores. A figura 60 detalha os conectores utilizados.

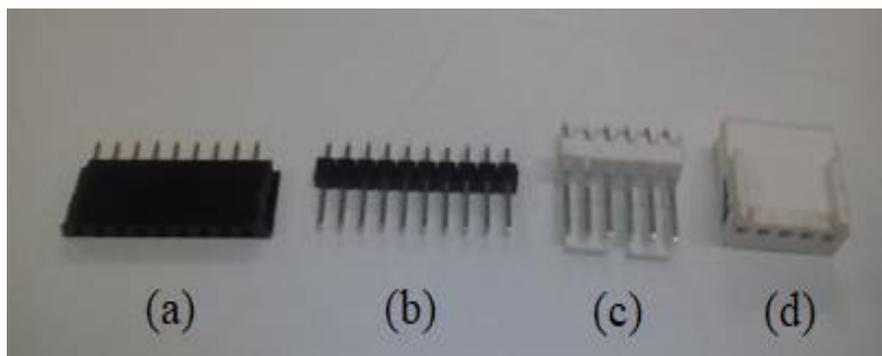


FIGURA 60 – Conectores utilizados na PCI: barra pino fêmea (a) e macho (b) e conector molex macho (c) e fêmea (d).

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Foram projetados dois modelos de placas de circuito impresso, nomeadas como A e B. A placa modelo A possui entradas para três termopares e três transdutores de pressão e a placa modelo B possui duas entradas para os módulos LDR, uma entrada para as chaves de nível e uma saída para conexão ao módulo relé. Foram confeccionadas seis placas no total, cinco do modelo A (sendo uma reserva) e uma modelo B pelo método de silcagem e corrosão química com perclorato de ferro. As figuras de 61 à 65 detalham as placas desenvolvidas para conexão e sua montagem.

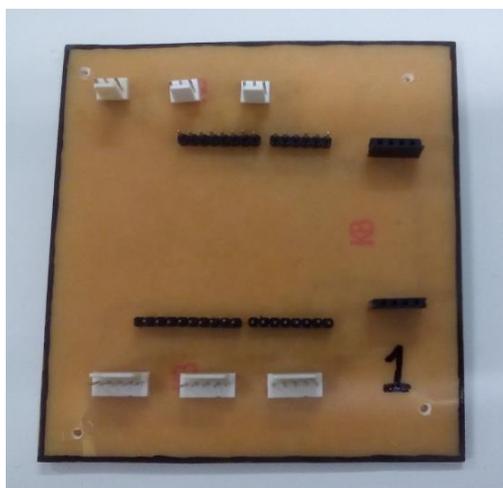


FIGURA 61 – Modelo de PCI “A”  
(face com os conectores para encaixe).

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

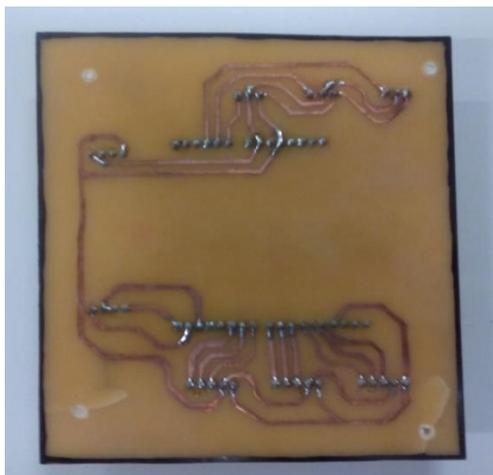


FIGURA 62 – Modelo de PCI “A” (face com as trilhas de ligação).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

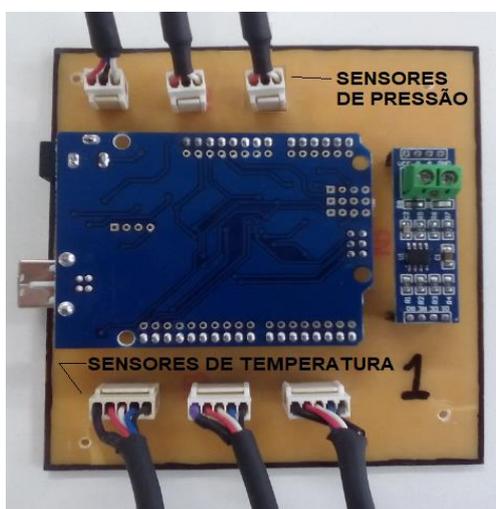


FIGURA 63 – Modelo de PCI “A” com os dispositivos conectados.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

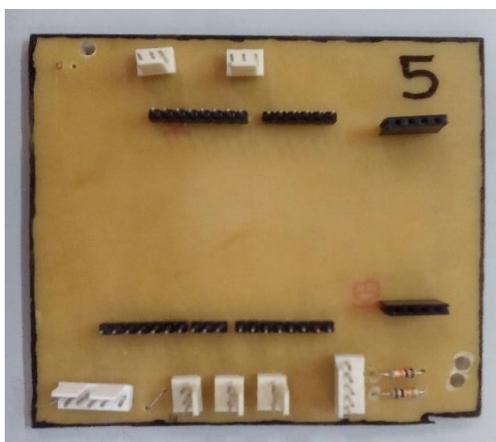


FIGURA 64 – Modelo de PCI “B” (face com os conectores para encaixe).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

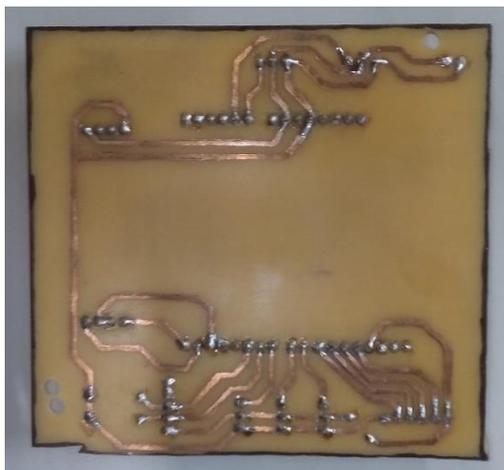


FIGURA 65 – Modelo de PCI “B” (lado com as trilhas de ligação).

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

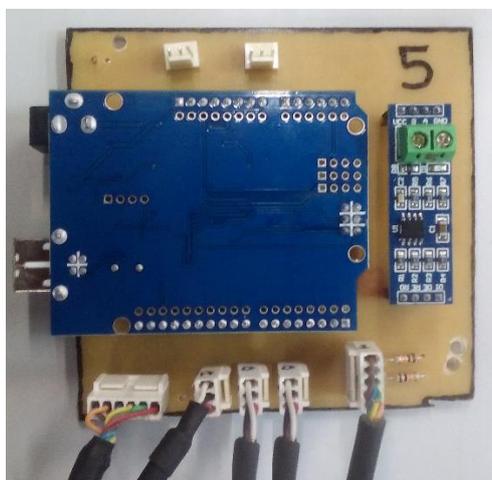


FIGURA 66 – Modelo de PCI “B” com os dispositivos conectados.

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.4.12 Painel eletrônico

As seis PCIs com os Arduinos acoplados foram fixadas em uma placa de montagem e acomodadas dentro de uma caixa hermetica colocada junto à planta, local para onde foram destinados os cabos dos sensores e atuadores através de tubulação própria, como mostra a figura 67. Conforme mostra a figura 68, na porta do painel montado, foram colocadas uma chave comutadora liga/desliga e uma botoeira de emergência para operação do sistema.



FIGURA 67 – Acomodação dos Arduinos Uno dentro do painel.

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.



FIGURA 68 – Painel de armazenamento dos Arduinos Uno.

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.5 Supervisório desenvolvido

No desenvolvimento do supervisório da planta de geração de potência, foi utilizado a versão educacional do software InduSoft Web Studio 8.0 (IWS), desenvolvido pela empresa InduSoft e disponibilizado para download gratuito no endereço eletrônico <http://www.indusoft.com/br/Downloads>. Esse programa permite construir aplicações

completas SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados) ou IHM (Interface Homem-Máquina) para a indústria de automação. A figura 69 mostra a tela principal deste *software*.

O IWS executa projetos em microcomputadores conectados em tempo real com processadores ou máquinas por meio de controladores programáveis, equipamentos de I/O remotos, e outros dispositivos de aquisição de dados. Estes projetos consistem em telas com interfaces animadas de operação, *drivers* configuráveis de CLP (controlador lógico programável) e outros dispositivos controláveis de I/O, um banco de dados de *tags* do projeto, e módulos opcionais como monitores de alarme, receitas, gráficos de tendências, lógica, organizadores e um sistema de segurança.

O projeto de desenvolvimento de um supervisor para uma planta de geração de potência consiste na elaboração de uma aplicação para monitoramento e operação do protótipo construído de modo que possa ser utilizado de maneira prática e segura, visualizando as variáveis do ciclo combinado Brayton-Rankine em funcionamento de forma intuitiva a partir de telas com diagramas de processo mostradas.

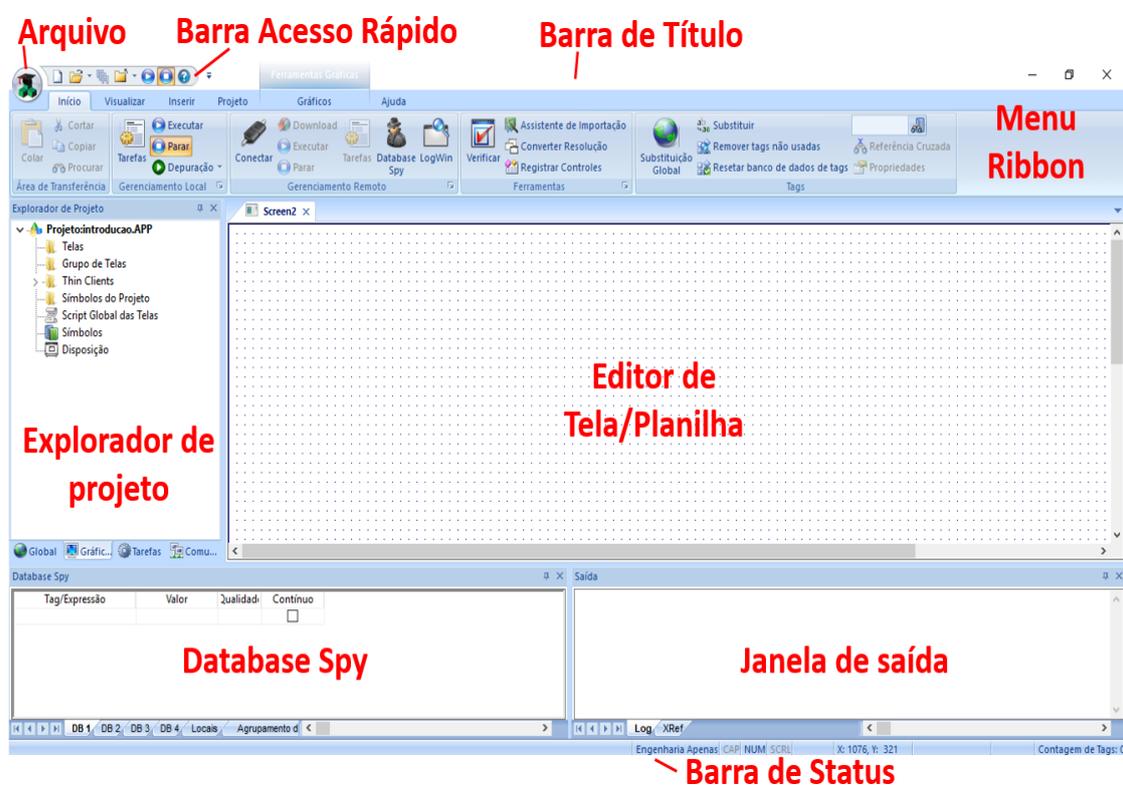


FIGURA 69 – Tela principal do *software* Indusoft Web Studio.

FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Para a criação da interface homem-máquina da planta de geração de potência, cinco telas de interação foram elaboradas, utilizando elementos gráficos disponíveis na biblioteca do IWS (motores, tanques e tubulação) e arquivos de imagens importadas e dispostas como pano de fundo, sobre as quais foram fixados botões de acionamento dos atuadores ou texto com *link* de dados onde são informados os valores medidos de temperatura e pressão.

O painel de controle é formado por uma tela principal apenas para monitoramento, com o diagrama de todo o processo Brayton-Rankine mostrando todos os valores de temperatura e pressão medidos, indicados nos pontos onde os sensores estão instalados. Também foram elaboradas duas telas, detalhando o ciclo Brayton e o ciclo Rankine, cada uma com seu respectivo diagrama, mostrando os valores dos sensores e disponibilizando os botões para acionamento dos atuadores envolvidos. A quarta e a quinta telas foram elaboradas contendo os gráficos para acompanhamento individual da variação dos valores de temperatura e pressão de cada sensor ao longo do tempo.

### 3.5.1 Tags

*Tags* são variáveis usadas pelo IWS para receber e armazenar os dados obtidos a partir da comunicação com dispositivos na planta, podendo ser utilizadas para mostrar informações nas telas, para manipular objetos e para controlar tarefas em execução. Ao se inserir uma *tag* no projeto, deve-se nomeá-la e defini-la quanto a um dos tipos de dado mostrados abaixo:

- Booleano - 0 (falso) e 1 (verdadeiro), usado para ligar e desligar objetos
- Inteiro - Número Inteiro (positivo, negativo ou zero)
- Real – utilizado para medições ou para valores decimais ou fracionários
- *String* - dado alfanumérico com até 1024 caracteres

A versão educacional utilizada do IWS disponibiliza um total de 4000 *tags* para uso. Para esse projeto de supervisório, foram criadas um total de 25 *tags*; 14 para receber os dados referentes aos sensores (12 para temperatura, 1 para pressão e 1 para vazão), 4 correspondendo aos atuadores e 7 para comandos de tarefas específicas e alarmes. A tabela 5 mostra as *tags* criadas detalhando a estação (placa microcontrolada) na qual se encontra, o tipo de ação e o tipo de dado de cada uma.

TABELA 5 – Lista de *tags* do projeto

TAG	ESTAÇÃO	AÇÃO	DADO
temp_camara_rankine	1	Ler	Inteira
temp_saida_economizador	1	Ler	Inteira
temp_entrada_aquecedor	1	Ler	Inteira
press_ar_comprimido	1	Ler	Inteira
temp_saida_brayton	2	Ler	Inteira
temp_camara_brayton	2	Ler	Inteira
temp_ar_ambiente	2	Ler	Inteira
temp_saida_superaquecedor	3	Ler	Inteira
temp_gas_chamine	3	Ler	Inteira
temp_entrada_superaquecedor	3	Ler	Inteira
temp_saida_aquecedor	4	Ler	Inteira
temp_ar_comprimido	4	Ler	Inteira
temp_agua_ambiente	4	Ler	Inteira
BOTAO_CENTELHA	5	Ler+Escrever	Booleana
BOTAO_VALVULAGLP	5	Ler+Escrever	Booleana
BOTAO_VALVULAGUA	5	Ler+Escrever	Booleana
BOTAO_BOMBADAGUA	5	Ler+Escrever	Booleana
BOTAO_TRANSFERIR_AGUA	5	Ler+Escrever	Booleana
BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES	5	Ler+Escrever	Booleana
VALOR_VAZAO	5	Ler	Inteira
LAMPADA_CHAMA_ACESA	5	Ler	Booleana
LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO	5	Ler	Booleana
LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR	5	Ler	Booleana
LAMPADA_AGUA_TRANSFERIDA	5	Ler	Booleana
QTDE_AGUA_TRANSFERIDA	5	Ler	Inteira

FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2019.

### 3.5.2 *Driver* de comunicação

A comunicação com equipamentos de aquisição de dados, controladores, CLPs, UTRs, ou qualquer outro tipo de equipamento, é feita através de *drivers* de comunicação próprios ou servidores OPC, de acordo com o tipo do equipamento ou tipo de comunicação necessária. A aquisição e envio de dados para os dispositivos conectados ao sistema supervisorio é fundamental para manter o operador ciente dos estados atuais do sistema. Assim, o operador pode agir no sistema de forma coesa, controlando os equipamentos que estejam conectados ao sistema.

Um *driver* de comunicação é uma DLL que contém informações específicas sobre o equipamento remoto e implementa o protocolo de comunicação permitindo definir a interface de comunicação entre o supervisorio e os equipamentos remotos, tais como um CLP, um *single-loop*, transmissores e medidores.

O IWS disponibiliza uma biblioteca com *drivers* de diversos desenvolvedores de tecnologia relacionada à automação como Siemens e Allen Bradley. Para se

estabelecer a comunicação RS485 entre o supervisor desenvolvido e as placas microcontroladas foi selecionado a DLL MODBU (MODBUS Protocol RTU/ASCII (CE) [v10.10]). As figuras 70 e 71 mostram as janelas destinadas à configuração do *driver* MODBU e os parâmetros selecionados.

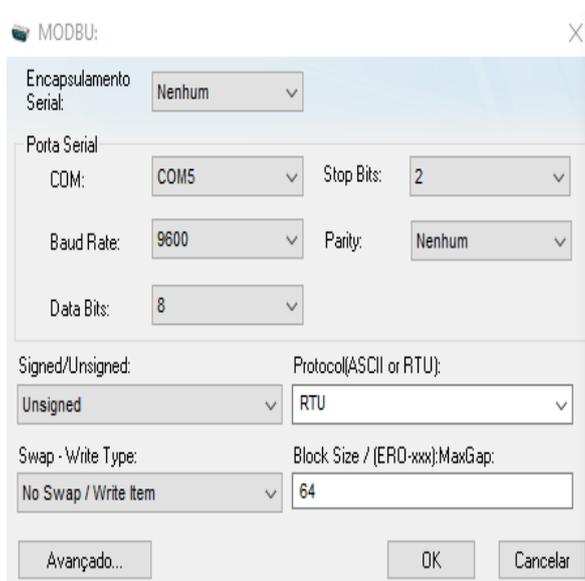


FIGURA 70 – Janela de configuração de parâmetros do *driver* de comunicação.

FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2019.

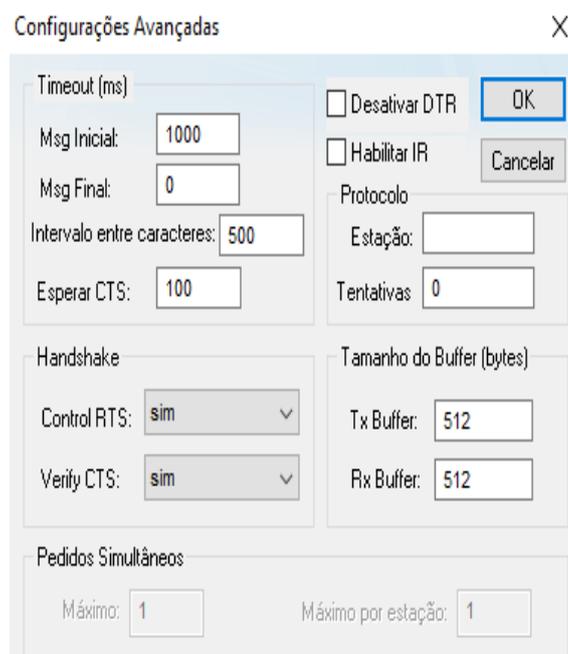


FIGURA 71 – Janela de configuração de parâmetros avançados do *driver* de comunicação.

FONTE: Arquivo pessoal do autor, 2019.

### 3.6 Os Ciclos Termodinâmicos de Potência

#### 3.6.1 O Ciclo Brayton

O sistema supervisorio deve monitorar o sistema de potência em operação, utilizando os ciclos Brayton, Rankine e Brayton-Rankine combinados. As variáveis de estado temperatura e pressão são registradas de modo que se obtenha os valores nos vários pontos físicos do protótipo, permitindo o controle de desempenho do sistema nos processos dos ciclos térmicos.

A planta de potência operando em regime de fluxo estacionário, tendo valores e parâmetros de projeto das variáveis de estado pré-estabelecidos adequadamente, permite o monitoramento que fornece os resultados a serem comparados aos teóricos calculados.

O ciclo ideal usado nas plantas de potência, que operam com turbina a gás, é o ciclo de Brayton, o qual utiliza o ar como substância de trabalho. Na operação em ciclo aberto, o ar entra no compressor, passa por uma câmara de combustão à pressão constante, em seguida atravessa uma turbina e, então, sai para a atmosfera como produto de combustão como mostrado na figura 72.

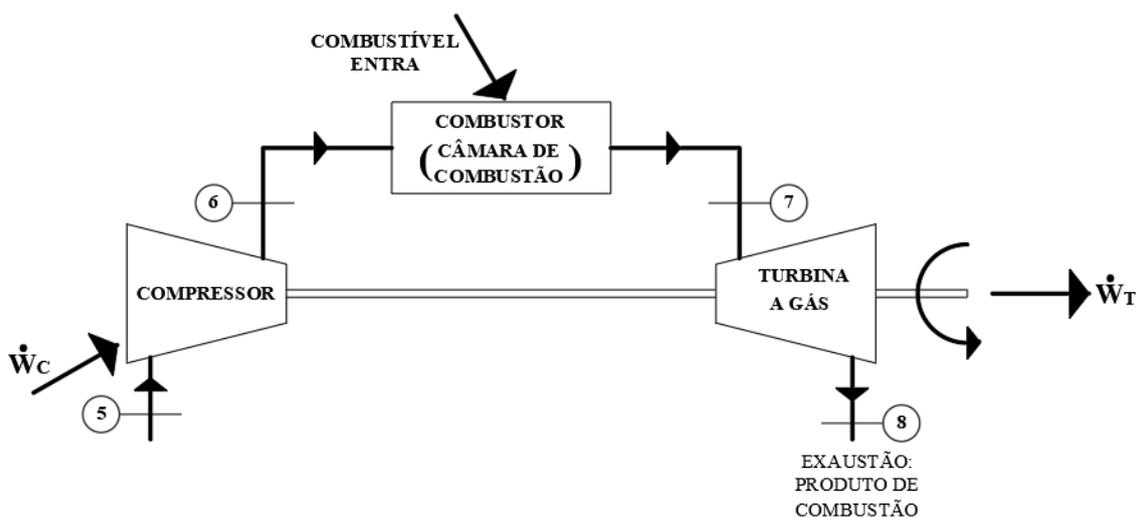


FIGURA 72 – Ciclo Brayton aberto.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Como mostrado na figura 73, na operação em ciclo fechado, a câmara de combustão é substituída por um trocador de calor, o qual fornece energia de uma fonte exterior ao ciclo. Um trocador de calor transfere energia do gás saindo da turbina para o

exterior, de modo que o ar retorne ao seu estado inicial ao entrar no compressor. Este é o ciclo usado em planta de potência nuclear.

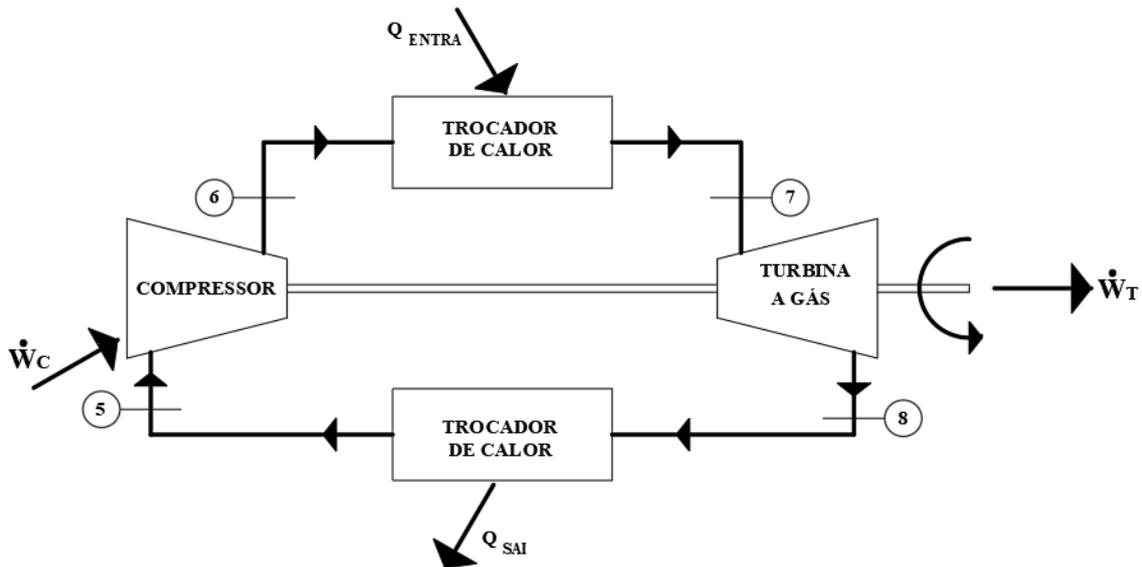


FIGURA 73 – Ciclo Brayton fechado.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

No ciclo Brayton, ocorrem compressão e expansão isentrópica no compressor e na turbina respectivamente. No combustor e trocador de calor, os processos são isobáricos com o primeiro à alta pressão e, o segundo, à baixa pressão. A figura 74 mostra os diagramas de estados pressão *versus* volume (a), e temperatura *versus* entropia (b).

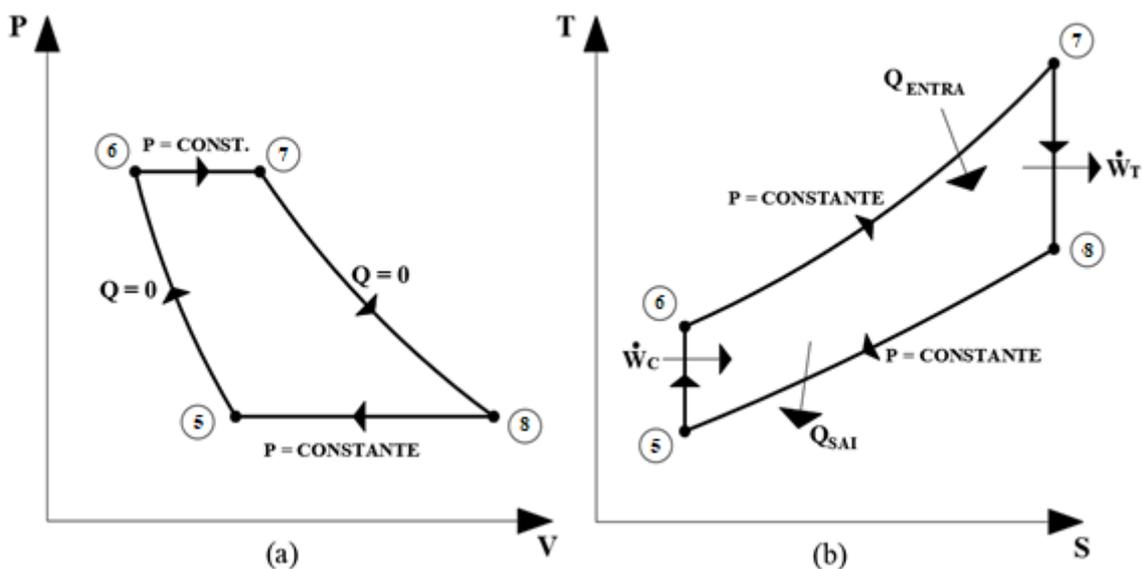


FIGURA 74 – Ciclo Brayton: (a) diagrama P x V; (b) diagrama T x S.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

As relações isentrópicas, com  $P_5 = P_8$ ,  $P_6 = P_7$  e  $K = \frac{C_P}{C_V} = 1,4$  para o ar, são (KEENAN, 1941):

$$\frac{P_6}{P_5} = \left(\frac{T_6}{T_5}\right)^{\frac{K}{K-1}} \quad e \quad \frac{P_7}{P_8} = \left(\frac{T_7}{T_8}\right)^{\frac{K}{K-1}} \quad (1)$$

Em que:

$T$  = temperatura nos pontos (5), (6), (7) e (8)

$P$  = pressão nos pontos (5), (6), (7) e (8)

$K$  = constante de equilíbrio do ar

$C_P$  = calor específico do ar a pressão constante (1,0048 kJ/kg. K)

$C_V$  = calor específico do ar a volume constante (0,717 kJ/kg. K)

Resultando:

$$\frac{T_6}{T_5} = \frac{T_7}{T_8} \quad ou \quad \frac{T_8}{T_5} = \frac{T_7}{T_6} \quad (2)$$

A eficiência térmica do ciclo é (KEENAN, 1941):

$$\eta = 1 - \frac{T_5}{T_6} = 1 - \left(\frac{P_5}{P_6}\right)^{\frac{K}{K-1}} \quad (3)$$

A razão de pressão “ $r_p$ ” é definido como sendo:  $r_p = \frac{P_6}{P_5}$ , resultando para eficiência (KEENAN, 1941):

$$\eta = 1 - r_p^{(1-K)/K} \quad (4)$$

As temperaturas  $T_5$  e  $T_7$  são parâmetros de projeto do ciclo, com  $T_5$  sendo a temperatura da atmosfera, e  $T_7$ , que é a maior temperatura do ciclo, depende do material metálico da turbina, podendo atingir 1100°C.

No ciclo de Brayton, o fator que limita a eficiência térmica é o valor do trabalho exigido no compressor, o qual é medido pela razão de trabalho de retorno definido pela

razão do trabalho  $\dot{W}_T$  da turbina pelo trabalho  $\dot{W}_C$  do compressor, o qual pode representar valor superior a 50% do trabalho de saída da turbina. O trabalho útil resultante é (RAJPUT, 2010):

$$\dot{W}_u = \dot{W}_T - \dot{W}_C \quad (5)$$

Em que:

$\dot{W}_T$  = trabalho da turbina a gás

$\dot{W}_C$  = trabalho do compressor

A razão de pressão para se ter o trabalho  $\dot{W}_u$  máximo é (RAJPUT, 2010):

$$r_p = \left( \frac{T_7}{T_5} \right)^{\frac{K}{2(K-1)}} \quad (6)$$

O rendimento máximo teórico é o de Carnot (RAJPUT, 2010):

$$\eta_{m\acute{a}x.} = 1 - \frac{T_5}{T_7} \quad (7)$$

Considerando o calor específico do ar à pressão constante igual a 1kJ/kg. K, o trabalho do compressor é (RAJPUT, 2010):

$$\dot{W}_C = \dot{m}_{ar} \times (T_6 - T_5) \quad (8)$$

Em que:

$\dot{m}_{ar}$  = taxa de fluxo de massa de ar em kg/s

No combustor o calor é (RAJPUT, 2010):

$$Q_{Entra} = \dot{m}_{ar} \times (T_7 - T_6) \quad (9)$$

E na turbina, o trabalho é (RAJPUT, 2010):

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{ar} \times (T_7 - T_8) \quad (10)$$

A figura 75 apresenta a tela desenvolvida para o supervisor com objetivo de monitorar e operar o ciclo Brayton. A saída da turbina à gás, estado (8), vai à caldeira do ciclo Rankine.

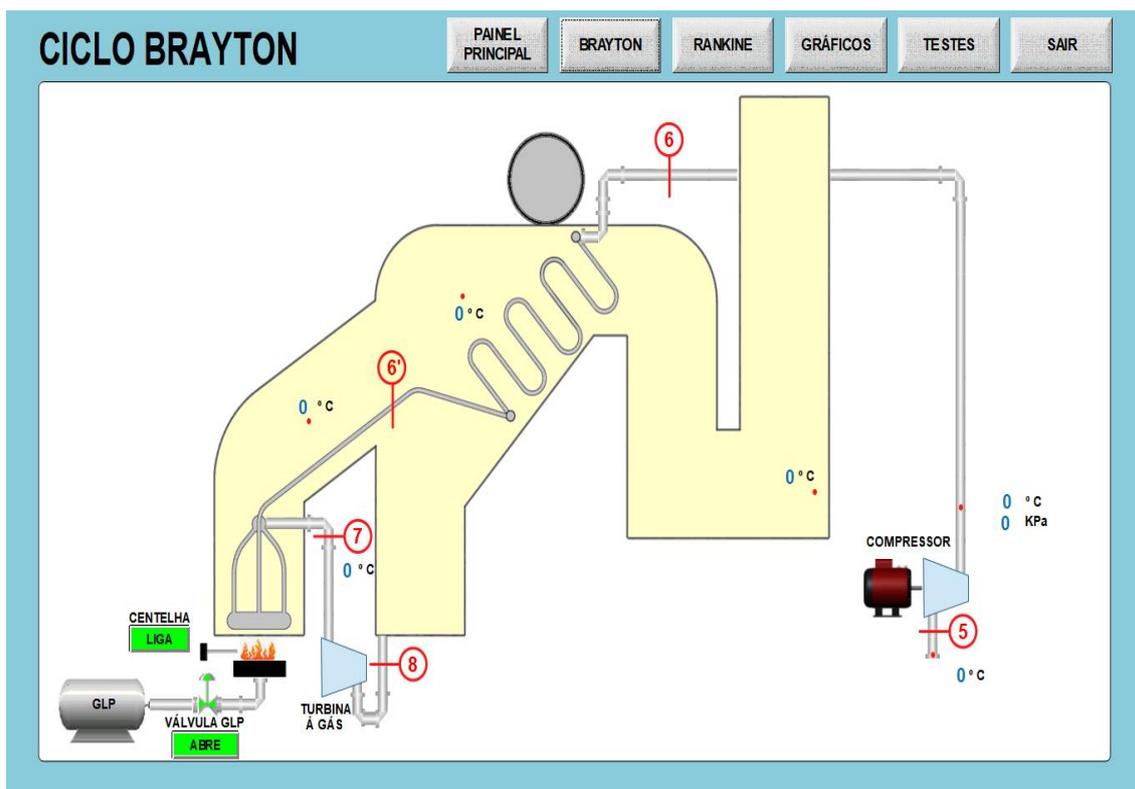


FIGURA 75 – Tela do ciclo Brayton do supervisor desenvolvido.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.6.2 O Ciclo Rankine

Na figura 76, está representado o ciclo de Rankine, cujos componentes são uma bomba, uma caldeira, uma turbina a vapor e um condensador. Na figura 77, está representado seu diagrama temperatura *versus* entropia.

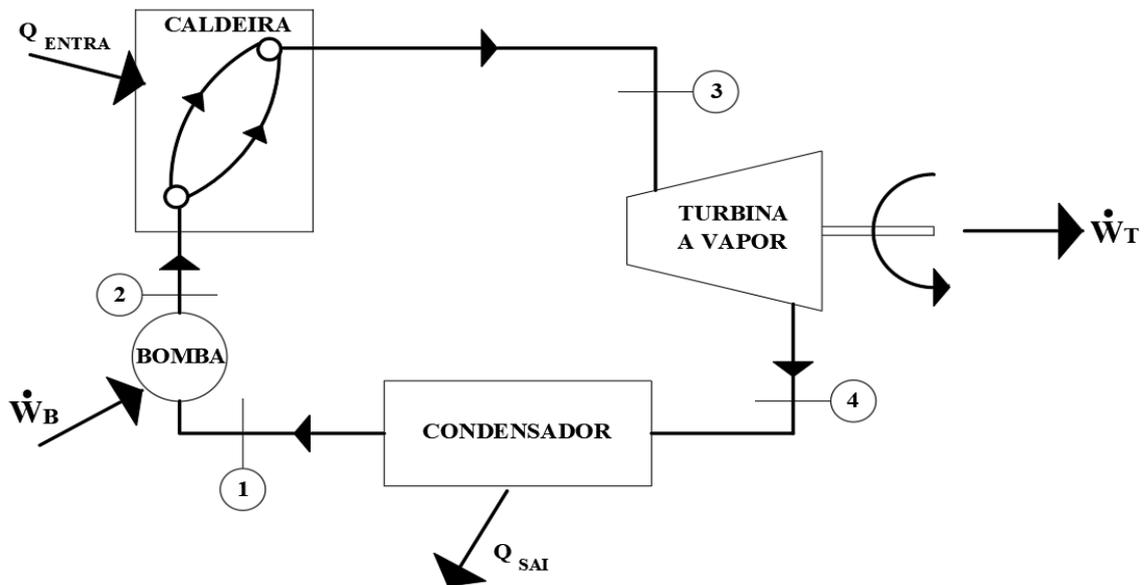


FIGURA 76 – Ciclo Rankine: componentes básicos.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

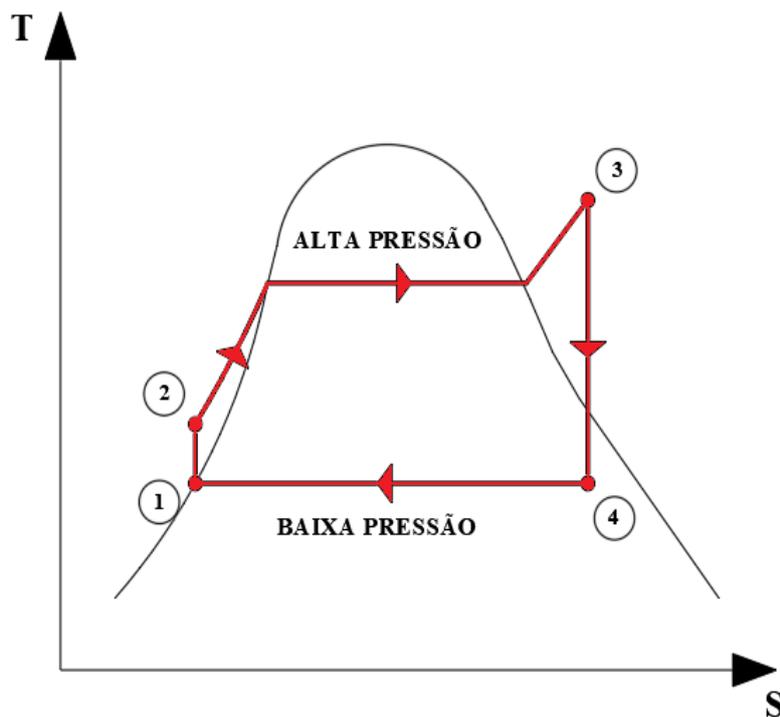


FIGURA 77 – Ciclo Rankine: diagrama temperatura-entropia T x S.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O trabalho  $\dot{W}_B$  da bomba é (KEENAN, 1941):

$$\dot{W}_B = (P_2 - P_1) \times v \quad (11)$$

Em que:

$v$  = volume específico do fluido

No estado (1) o líquido é saturado, e ao entrar na bomba, sua pressão aumenta de  $P_1$  a  $P_3$ . Ao entrar na caldeira, é vaporizado, atingindo a temperatura no estado (3) de vapor superaquecido.

Dos estados (3) ao (4), o processo ocorre na turbina adiabaticamente, sendo uma transformação isoentrópica. No estado (4), a substância de trabalho é uma mistura líquido-vapor, apresentando qualidade ou título “ $x$ ”, o qual fornece a razão da massa de vapor presente em relação a massa total da mistura.

Na caldeira a água recebe calor e vaporiza, saindo à temperatura e pressão de vapor superaquecido. Ao entrar na caldeira, o fluido está em estado de líquido saturado com entalpia pequena, comparada a entalpia de saída. O calor fornecido ao fluido é dado pela equação (KEENAN, 1941):

$$Q_{caldeira} = \dot{m}_{H_2O} (h_3 - h_2) \quad (12)$$

Em que:

$\dot{m}_{H_2O}$  = taxa de fluxo de massa de água em kg/s

$h_2$  = entalpia do líquido na entrada da caldeira

$h_3$  = entalpia do vapor na saída da caldeira

Da saída da caldeira, o vapor entra na turbina, ocorrendo a sua expansão adiabática, com transferência de energia térmica ao rotor da turbina, e geração de energia mecânica de rotação. Ao ser acoplado ao eixo de um gerador elétrico, a energia mecânica é convertida em energia elétrica  $\dot{W}_T$  dado por (KEENAN, 1941):

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{H_2O} \times (h_3 - h_4) \quad (13)$$

Em que:

$h_4$  = entalpia do vapor na saída da turbina

O processo termodinâmico que ocorre entre a entrada e a saída da turbina é isoentrópico com entropia  $S_3$  na entrada igual a  $S_4$  na saída. Na saída da turbina, a mistura apresenta título ou qualidade “ $x$ ”, dado por (OBERT; YOUNG, 1962):

$$S_4 = (x \cdot S_{fg}) + S_f \quad (14)$$

Em que:

$S_4$  = entropia na saída da turbina (igual à entropia  $S_3$  na entrada da turbina)

$x$  = razão da massa de vapor presente na substância no estado (4)

$S_f$  = entropia do líquido no estado (4) à pressão do condensador

$S_{fg}$  = a diferença das entropias do vapor e do líquido no estado (4)

Obtido o título “ $x$ ” calcula-se a entalpia em (4), expressa por (OBERT; YOUNG, 1962):

$$h_4 = (x \cdot h_{fg}) + h_f \quad (15)$$

Em que:

$h_{fg}$  = a diferença das entalpias do vapor e do líquido no estado (4)

$h_f$  = entalpia do líquido no estado (4) à pressão do condensador

No condensador, o processo ocorre à pressão constante, com pressão de vapor na saída da turbina condensando ao estado líquido do estado inicial do ciclo.

O rendimento máximo da geração é a da Máquina de Carnot operando entre as temperaturas mínima  $T_1$  e máxima  $T_3$  da planta (VAN WYLEN ET AL, 1994):

$$\eta_{Carnot} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right) \quad (16)$$

O rendimento do ciclo associado a planta é (VAN WYLEN ET AL, 1994):

$$\eta = \left( \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_B}{Q_{caldeira}} \right) \quad (17)$$

Em que:

$\dot{W}_T$  = trabalho da turbina à vapor

$\dot{W}_B$  = trabalho da bomba

$Q_{caldeira}$  = calor fornecido ao fluido pela caldeira

Na saída da turbina, estado (4), o conteúdo da mistura do vapor com qualidade ou título baixo contém presença de partículas líquidas na massa de vapor, que ao passar pelas pás da turbina à altas velocidades, geram desgaste em suas superfícies por erosão, tendo como resultado, diminuição da vida útil do rotor. A erosão das pás da turbina é evitada e grandemente diminuída, limitando o conteúdo da fração líquida da mistura ao máximo de 15%, com título ou qualidade “ $x$ ”  $\geq 85\%$  (RAJPUT, 2010).

O ciclo de Rankine com reaquecimento proporciona aumento na eficiência da planta de potência, bem como alta qualidade da mistura de saída da turbina, apresentando “ $x$ ”  $> 90\%$  (RAJPUT, 2010). Este ciclo é apresentado na figura 78 com o reaquecimento iniciando no estado (4) e terminando no estado (6) na saída da segunda turbina. A expansão do vapor do estado inicial (1) até a pressão do condensador se processa por duas ou mais etapas, na dependência de se usar um ou mais reaquecedores. Na figura 79, está representado seu diagrama temperatura *versus* entropia.

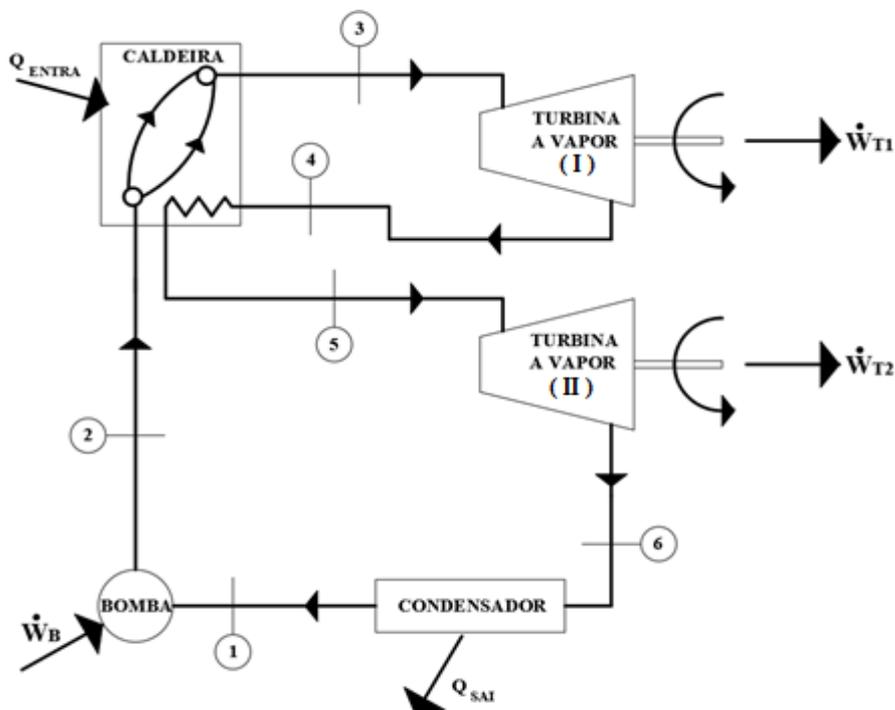


FIGURA 78 – Ciclo Rankine com reaquecimento.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

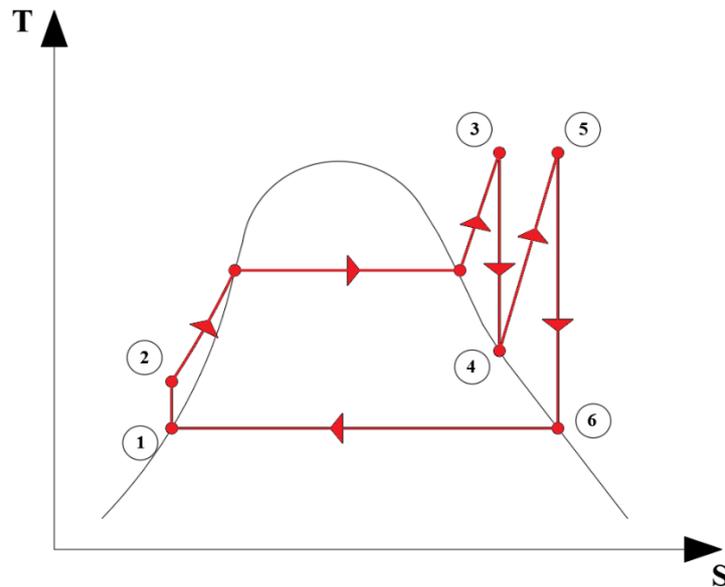


FIGURA 79 – Ciclo Rankine com reaquecimento.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Inicialmente o vapor expande no estágio de alta pressão da turbina dos estados (3) ao (4). O vapor é então reaquecido à pressão constante  $P_4$ , estado (4) seguindo o processo (4) a (5), com expansão no processo (5) a (6) na turbina de baixa pressão.

A pressão no estado (4) de reaquecimento deve situar-se entre 0,10 a 0,25 do valor da pressão no estado (3) (KEENAN, 1941).

Para o ciclo da figura 70, considerando a massa de vapor igual a 1 kg, onde as energias são (KEENAN, 1941):

$$Q_{1(\text{Calor na caldeira})} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (18)$$

$$Q_{2(\text{Calor no condensador})} = h_6 - h_1 \quad (19)$$

$$\dot{W}_{T(\text{Trabalho da turbina})} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_6) \quad (20)$$

$$\dot{W}_{B(\text{Trabalho da bomba})} = (P_2 - P_1) \cdot v \quad (21)$$

Em que:

$h$  = entalpias dos estados de (1) a (6)

$\dot{W}_T$  = soma das potências das turbinas (I) e (II)

O rendimento é expressado por (KEENAN, 1941):

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)} = \left( \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_B}{Q_{caldeira}} \right) \quad (22)$$

A figura 80 apresenta a tela desenvolvida para o supervisor com objetivo de monitorar e operar o ciclo Rankine.

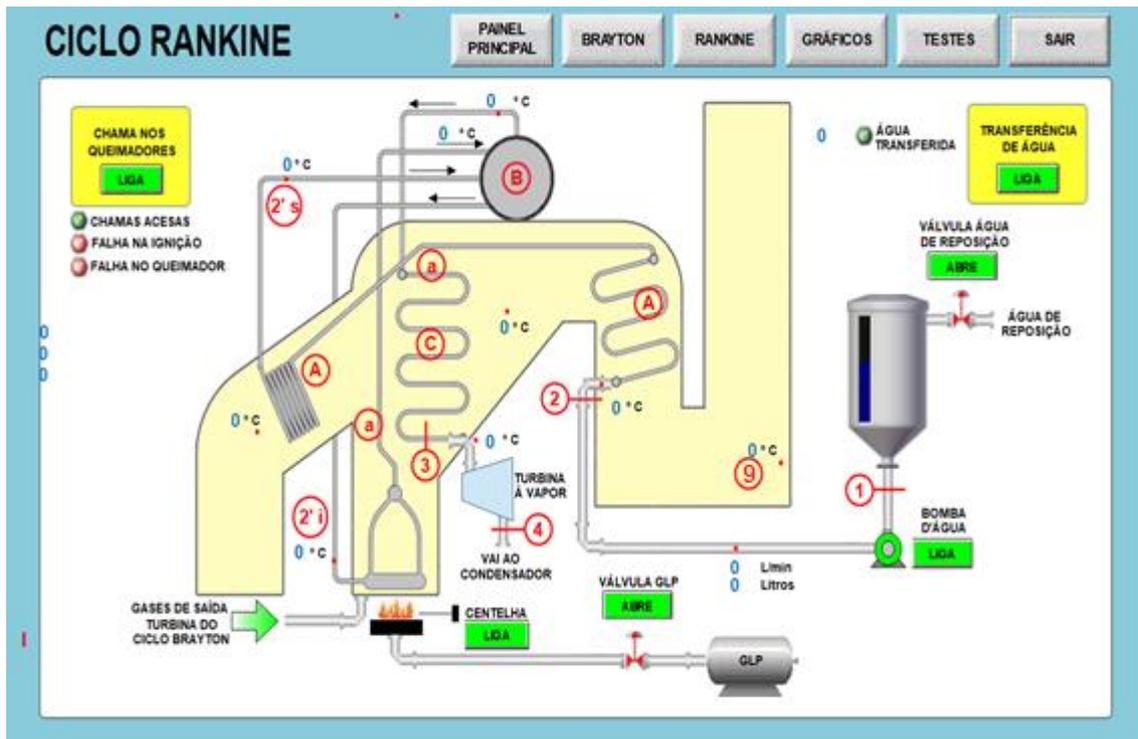


FIGURA 79 – Tela do ciclo Rankine do supervisor desenvolvido.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Pontos indicados na figura representam:

- (1) entrada de água na bomba
- (2) temperatura da água na saída da bomba
- (2' s) temperatura da água na entrada do vaso de pressão
- (2' i) temperatura da água na entrada da fornalha
- (3) temperatura de saída do superaquecedor e entrada na turbina a vapor
- (4) temperatura de saída na turbina a vapor
- (9) temperatura no ponto da entrada dos gases na chaminé
- (A) Economizador
- (B) Vaso de pressão
- (C) Superaquecedor
- (a) temperatura do vapor na entrada do superaquecedor

### 3.6.3 O Ciclo Combinado Brayton-Rankine

No arranjo combinado Brayton-Rankine o calor liberado pelo ciclo de Brayton é usado parcial ou totalmente como entrada de calor para o ciclo de Rankine. No caso da geração de energia elétrica, através do ciclo combinado gás-vapor Brayton-Rankine, os gases de exaustão da turbina a gás estão numa temperatura relativamente alta, normalmente entre 450 e 550°C, condição que permite seu emprego na geração de vapor que alimenta o ciclo de Rankine.

A baixa eficiência do ciclo de Brayton básico tem como causa principal a quantidade substancial de energia de entrada perdida na exaustão de saída da turbina para o meio-ambiente, com os gases à temperatura relativamente alta, podendo ser usada efetivamente para produção de potência.

O ciclo combinado Brayton-Rankine utiliza a alta temperatura de exaustão dos gases da turbina como fonte de energia à caldeira do ciclo Rankine (KEENAN, 1941), conforme figura 81, com a temperatura  $T_9$  do ciclo Brayton menor do que  $T_3$  do ciclo Rankine, conforme o diagrama na figura 82.

No ciclo combinado, os três parâmetros que regulam a eficiência térmica são o valor  $\Delta T_{pinch} = T_{9'} - T_{2'}$  da diferença de temperaturas, em pontos de mesma entropia (9') e (2'), denominado “*pinch point*” (KHALIQ; KAUSHIK, 2004), que define a aproximação térmica dos ciclos, conforme figura 81, a temperatura  $T_7$  na entrada da turbina a gás, e a qualidade ou título “*x*” do vapor na saída da turbina a vapor do ciclo Rankine.

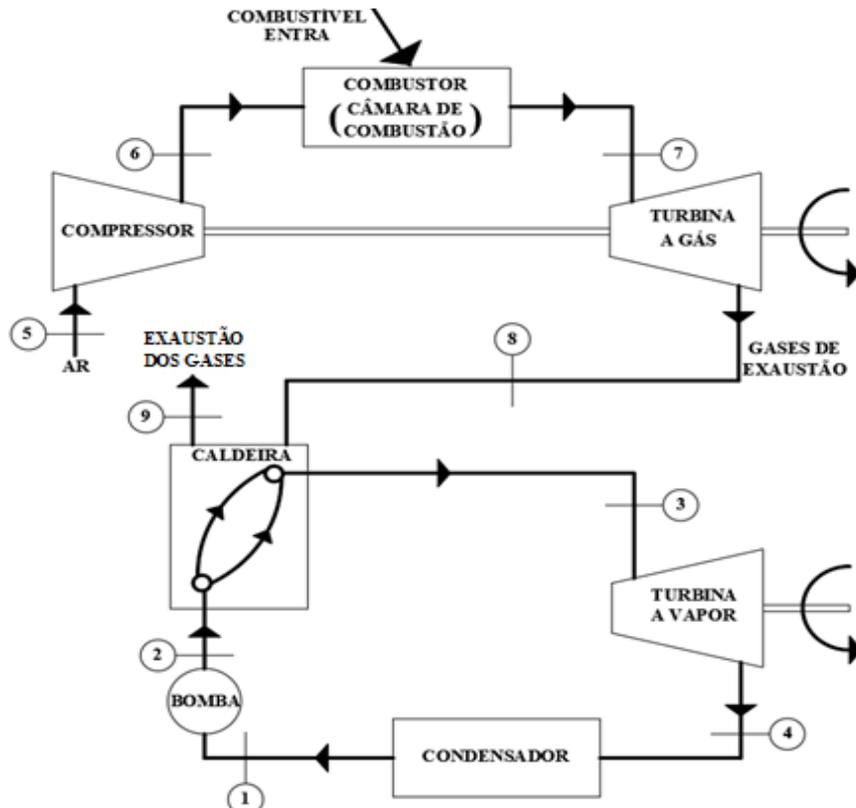


FIGURA 81 – Ciclo combinado Brayton-Rankine. Diagrama dos componentes principais.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

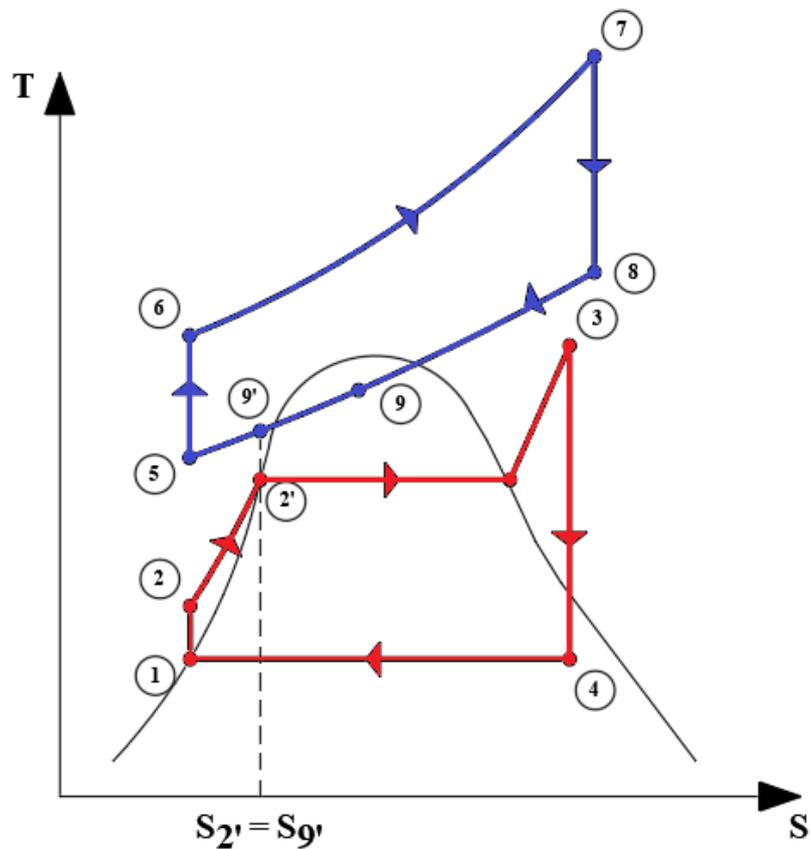


FIGURA 82 – Ciclo combinado Brayton-Rankine. Diagrama T x S.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

Na caldeira, o fluxo de massa do ar  $\dot{m}_{ar}$  do ciclo Brayton relaciona-se ao fluxo de massa de vapor de água  $\dot{m}_{H_2O}$  do ciclo Rankine, por meio do balanço de energia (KEENAN, 1941):

$$\dot{m}_{ar} \times (h_8 - h_9) = \dot{m}_{H_2O} \times (h_3 - h_2) \quad (23)$$

A eficiência do ciclo combinado tendo o ciclo Brayton eficiência  $\eta_1$  e o Rankine  $\eta_2$ , é (KEENAN, 1941):

$$\eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV}}{Q_{entra}} \quad (24)$$

Em que:

$Q_{entra}$  = calor de entrada no combustor.

$W_{TG}$  = trabalho de saída da turbina a gás (Brayton).

$W_{TV}$  = trabalho de saída da turbina a vapor (Rankine).

A figura 83 apresenta a tela desenvolvida para o supervisor com objetivo de se monitorar o ciclo combinado Brayton-Rankine.

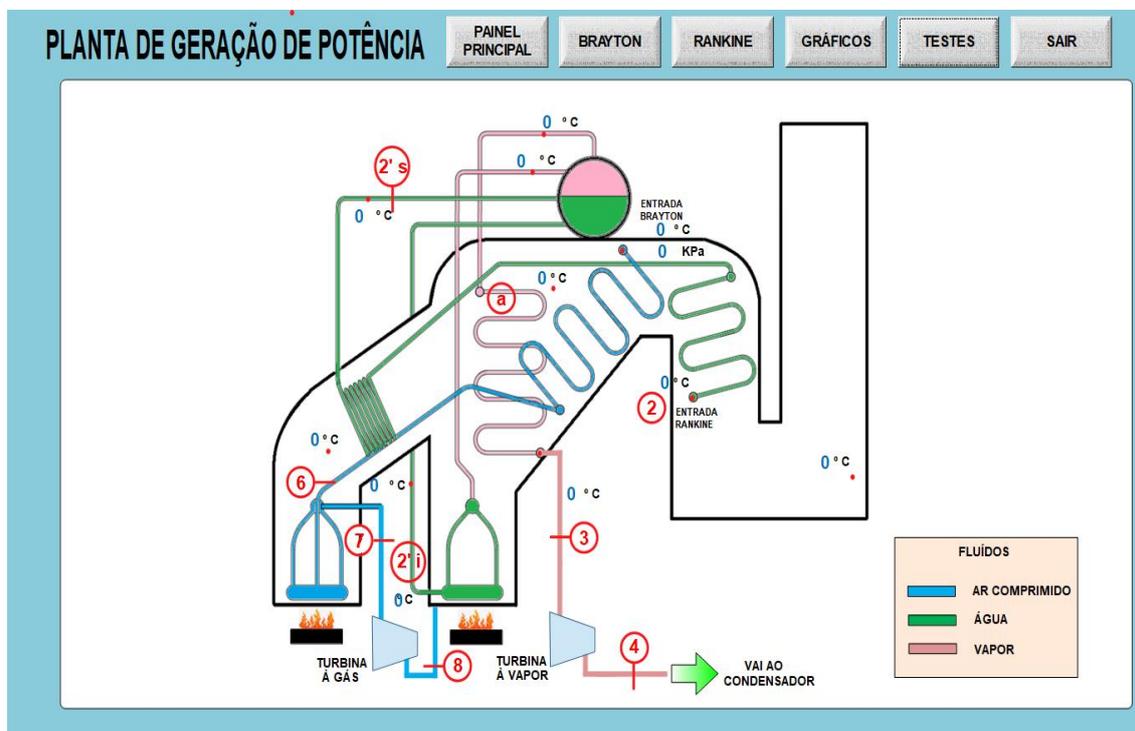


FIGURA 83 – Tela principal do supervisor desenvolvido.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2018.

### 3.7 Sistema de partida da planta de geração de Potência

Dentro do processo de funcionamento do protótipo de geração de potência, foi observada a necessidade de se projetar um sistema que garantisse maior segurança e praticidade no modo de se operar a planta. Foram considerados dois pontos críticos em sua operação: a partida e o monitoramento das chamas nos queimadores.

Durante o estágio de iniciação da planta de geração de potência, é obrigatória a execução de uma série de procedimentos que devem ser feitos em sequência correta até que o equipamento atinja as condições de entrar em funcionamento. A ocorrência de alguma falha na execução dessas etapas pode provocar um acidente grave ou danificar o protótipo.

Um dos itens mais importantes a se observar antes de se realizar o acendimento das chamas na caldeira é confirmar a presença dos fluidos dentro das serpentinas antes de iniciar seu aquecimento, pois sua falta pode causar danos aos tubos que compõem os ciclos termodinâmicos. Portanto, deve-se garantir a existência de água em quantidade correta dentro do conjunto trocador de calor no ciclo Rankine e que também esteja sendo fornecida uma vazão de ar comprimido suficiente para o ciclo Brayton.

Outro item que se deve dar atenção é quanto ao procedimento para realizar o acendimento das chamas nos queimadores e em seguida sua manutenção durante o funcionamento da caldeira. Após efetuar a abertura do gás GLP nos queimadores, as tentativas de centelhamento devem ser feitas de maneira rápida e caso a chama não consiga ser gerada, o procedimento deve ser cancelado imediatamente com o fechamento da válvula de gás. O fechamento do gás também deve ser feito se em algum momento durante o processo, alguma das chamas vier a apagar, pois se a válvula permanecer aberta, o GLP irá se acumular dentro da planta e no ambiente próximo, com alto risco de provocar uma explosão ou intoxicação a quem estiver próximo.

A partir dessa premissa, foi desenvolvido e inserido ao projeto um sistema que realizasse o controle desses pontos críticos observados na operação. Foi então desenvolvido um *software* em linguagem C++ para a plataforma Arduino para realização de algumas rotinas e inserida no programa do Arduino Uno número 5, e alguns elementos gráficos foram fixados na tela do supervisor para o acionamento e acompanhamento dessas rotinas. Foi criado um comando para transferência de água entre o tanque reservatório e o trocador de calor (Ciclo Rankine), um comando para acendimento das chamas e um sistema de monitoramento das chamas durante o funcionamento da caldeira.

### 3.7.1 Transferência de água para a planta

Para gerar praticidade na operação da transferência da água do tanque reservatório para a caldeira, foi criado um comando que realiza uma rotina para essa tarefa, que se inicia através de um simples acionamento pelo supervisório. Na tela reservada ao ciclo Rankine foi criado um botão para esse acionamento, como mostra a figura 84.



FIGURA 84 – Botão para transferência de água, disponível no supervisório.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Esse comando primeiramente efetua uma análise do nível de água no tanque reservatório através do estado das duas chaves de nível presentes em seu interior. Se não houver a quantidade suficiente, a válvula solenoide é aberta para que entre água até que se atinja o nível necessário, fechando-a logo em seguida. Na próxima etapa, a bomba de água é acionada e transfere 10 litros de água para o trocador de calor, quantidade necessária para preencher até a metade do tubulão. O controle da quantidade transferida é feito através da análise de uma contagem feita utilizando o sensor de vazão YF-S201, que ao contabilizar a transferência de 10 litros de água, desliga-se a bomba. Quando o processo é concluído, uma lâmpada indicativa com a mensagem “Água Transferida” acende na tela do supervisório avisando ao operador, e esta permanece acesa até que se pressione “desligar” no botão “Transferência de Água”. A figura 85 mostra essa lâmpada indicativa. Durante a execução do processo de transferência de água, se o botão “desligar” for pressionado, a rotina paralisa e o processo só é retomado quando o botão “ligar” for pressionado novamente.

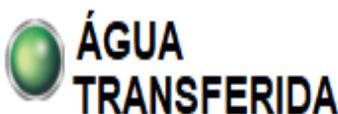


FIGURA 85 – Lâmpada indicativa do *status* da transferência de água, disponível no supervisório.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

A figura 86 apresenta o fluxograma completo do processo de transferência de água entre o tanque reservatório e o trocador de calor.

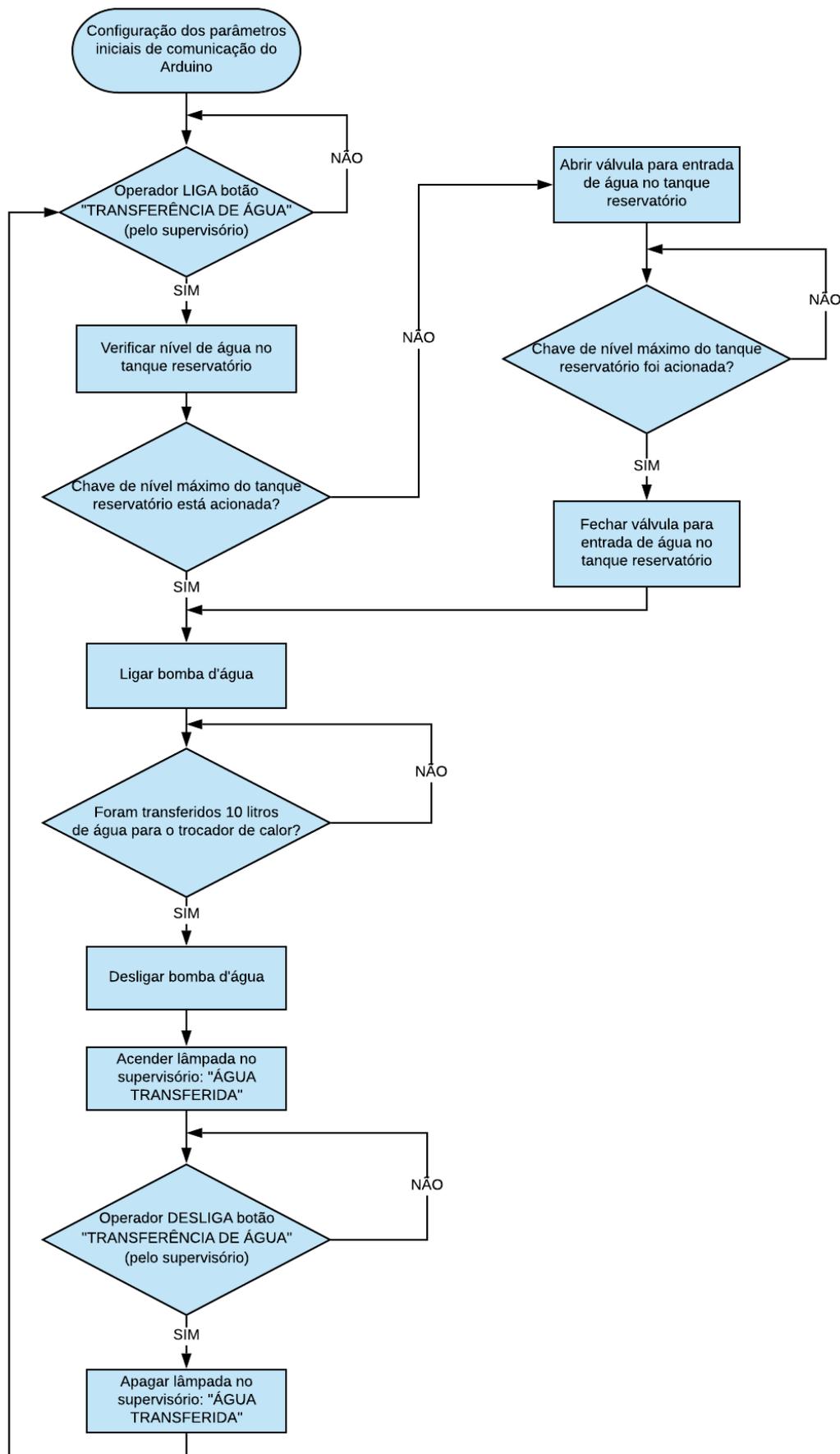


FIGURA 86 – Fluxograma da rotina de transferência de água.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

### 3.7.2 Sistema de ignição e monitoramento dos queimadores

Para poder realizar o procedimento de ignição dos queimadores com maior segurança e praticidade, foi criado um comando que executa uma rotina para essa tarefa, que se inicia através de um simples acionamento pelo supervisor. Nas telas reservadas ao ciclo Rankine e ciclo Brayton, foram inseridos botões para o acionamento desse comando, como mostra a figura 87.

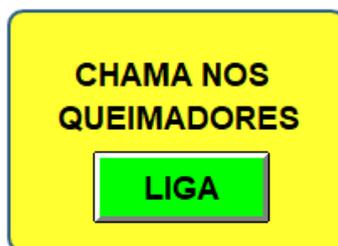


FIGURA 87 – Botão para acendimento dos queimadores disponível no supervisor.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Para iniciar o procedimento de acendimento das chamas dos queimadores, duas condições devem ser atendidas: o trocador de calor deve estar com a quantidade de água necessária e deve estar sendo fornecido uma vazão de ar comprimido suficiente para o ciclo Brayton. Atendidas essas condições, o operador pode dar início ao processo de acendimento das chamas nos dois queimadores ligando o botão “Chama nos Queimadores” presente na tela do supervisor. Esse comando primeiramente efetua a abertura da válvula de gás para os queimadores. Em seguida são realizados centelhamentos (3 tentativas) para se acender as chamas. Se após alguma das tentativas as duas chamas forem geradas, os dois sensores LDR fazem sua detecção e as tentativas restantes (se houver) não serão efetuadas. Então, uma lâmpada indicativa com a mensagem “Chamas Acesas” permanecerá ligada no supervisor avisando ao operador. Porém, se após os três centelhamentos um ou os dois queimadores não gerarem chama, a válvula de gás é imediatamente fechada e em seguida uma lâmpada indicativa com a mensagem “Falha na Ignição” se acenderá, e assim permanecerá até que se desligue o botão “Chama nos Queimadores”, e assim o procedimento poderá ser reiniciado. A figura 88 mostra as lâmpadas indicativas dos *status* da chama do queimador.

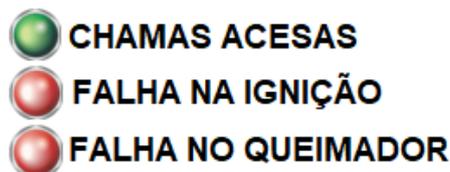


FIGURA 88 – Lâmpadas indicativas do estado dos queimadores disponível no supervísório.

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Se a ignição nos dois queimadores for realizada com sucesso, então se inicia o processo de monitoramento das chamas durante o funcionamento da caldeira. Se em algum momento uma ou as duas chamas se apagarem, a válvula de gás é fechada imediatamente parando o fornecimento de GLP para os queimadores. Em seguida, uma lâmpada indicativa com a mensagem “Falha no Queimador” se acenderá na tela do supervísório para avisar ao operador, e assim permanecerá até que se desligue o botão “Chama nos Queimadores”, e neste momento, o procedimento de acendimento das chamas poderá ser reiniciado.

Quando o funcionamento da caldeira for encerrado ou houver a necessidade de ser paralisado, o operador deve simplesmente desligar o botão “Chama nos Queimadores” para cortar imediatamente o fornecimento de gás para os queimadores e conseqüentemente apagar as chamas. A figura 89 apresenta o fluxograma completo do processo de ignição, monitoramento dos queimadores e desligamento das chamas.

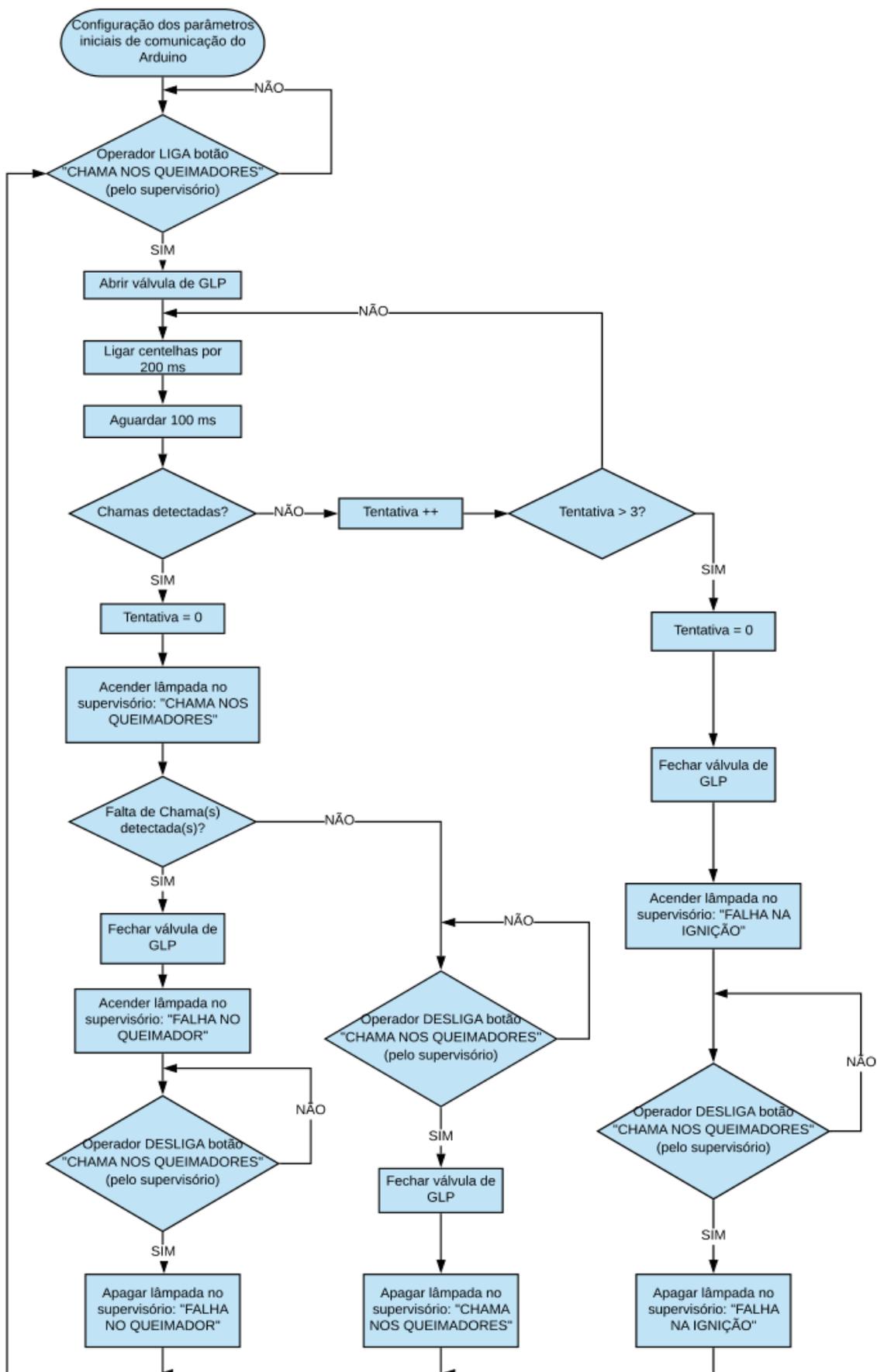


FIGURA 89 – Fluxograma da rotina de acendimento/monitoramento das chamas.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A produção de energia elétrica em plantas de geração térmica, com a utilização de combustível fóssil ou de fontes renováveis como bagaço de cana, madeira, etc.; o grau de conversão da energia química do combustível para energia elétrica, pode ser otimizada em grau maior de eficiência, usando o ciclo combinado Brayton-Rankine, com o calor dos gases de exaustão da turbina à gás sendo usado como calor de recuperação em geradores de vapor de água.

Para efeito de comparação de desempenho e ganhos na eficiência de operação, foram considerados processos de conversão em ciclos Rankine e Brayton básicos e individuais e, então, no de ciclo combinado Brayton-Rankine.

No ciclo Rankine, os parâmetros de projeto são:

$P = 1 \text{ kW}$ ;

$P_1 = 10 \text{ kPa}$ : pressão no condensador;

$P_3 = 800 \text{ kPa}$ : pressão na entrada da turbina à vapor.

Condição de entrada do vapor na turbina: 0,8 MPa, 400°C, sem considerar as quedas de pressão e as perdas térmicas. Os calores absorvidos em cada etapa são (OBERT; YOUNG, 1962):

Calor absorvido no economizador:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{H_2O} \times (h_{2'} - h_2) \quad (25)$$

Calor absorvido no evaporador:

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_{H_2O} \times (h_a - h_{2'}) \quad (26)$$

Calor absorvido no super-aquecedor:

$$\dot{Q}_{SA} = \dot{m}_{H_2O} \times (h_3 - h_a) \quad (27)$$

Em que:

$\dot{m}_{H_2O}$  = taxa de fluxo de massa de água em kg/s

h = entalpia dos estados (1), (2), (2'), (a) e (3)

A pressão no estado 1 ( $P_1$ ) é igual à 10 kPa e no estado 2 ( $P_2$ ) é igual à 800 kPa.

Com  $\dot{W}_T$  o trabalho de saída na turbina igual a 1kW, tem-se (KEENAN, 1941):

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{H_2O} \times [(h_a - h_1) + (h_b - h_a) + (h_3 - h_b)] = 1 \text{ kJ/s} \quad (28)$$

Resulta  $\dot{m}_{H_2O} = 0,0011 \text{ kg/s}$

TABELA 6 – Entalpias em pontos do Rankine

h	kJ/kg
$h_1$	191,8
$h_2$	192,6
$h_{2'}$	721,1
$h_a$	2769,1
$h_3$	3267,1

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O processo adiabático que ocorre na turbina, permite a determinação do título  $x$  da mistura no estado 4, com o uso das equações (11) e (12) obtém-se  $x = 0,923$  e  $h_4 = 2400,7 \text{ kJ/kg}$ . Usando as equações (25), (26) e (27) encontra-se o calor absorvido no economizador  $\dot{Q}_E$ , evaporador  $\dot{Q}_V$  e super-aquecedor  $\dot{Q}_{SA}$ :

$$\dot{Q}_E = 0,5814 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_V = 2,2528 \text{ kJ/s}$$

$$\dot{Q}_{SA} = 0,5478 \text{ kJ/s}$$

Com os modelos de trocas de calor no economizador mostrados na figura 90, resultam as temperaturas  $T_a = 170,4^\circ\text{C}$  e  $T_2 = 45,8^\circ\text{C}$  dos estados (a) e (b) da figura 80.

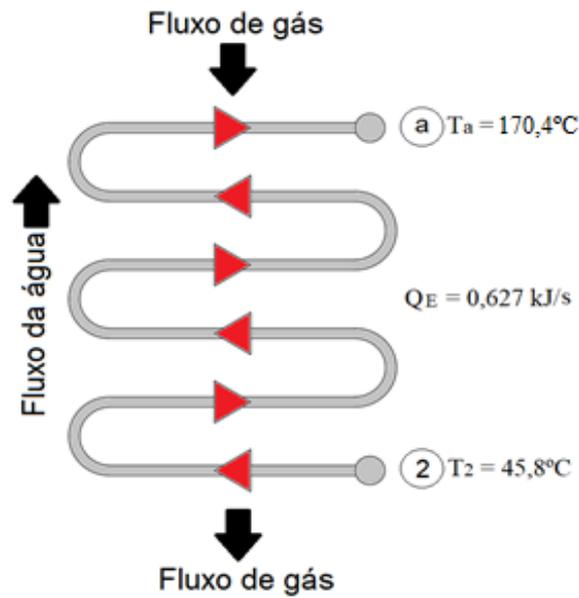


FIGURA 90 – Modelos de trocas de calor no economizador.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Com os modelos de trocas de calor no super-aquecedor mostrados na figura 91, as temperaturas dos estados (b) e (3) da figura 80 são, respectivamente 170,4°C e 400°C.

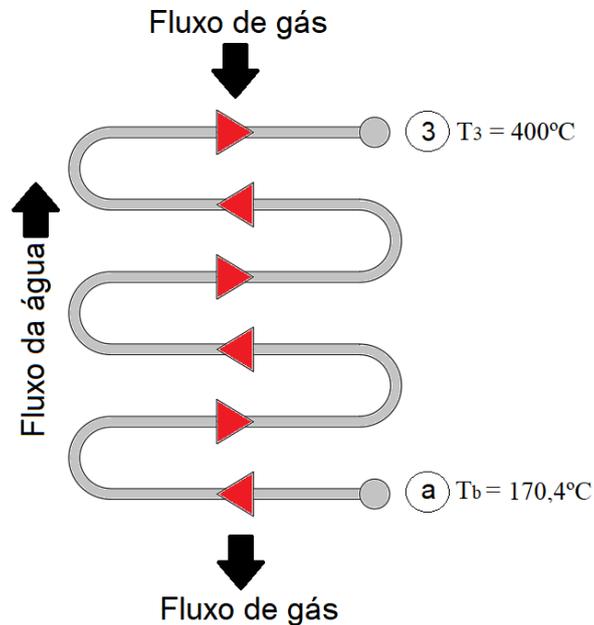


FIGURA 91 – Modelos de trocas de calor no super-aquecedor.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

As equações (9), (10) e (11), fornecem o calor  $\dot{Q}$ , o trabalho de saída na turbina  $\dot{W}_T$  e o rendimento  $\eta_{\text{CICLO}}$ :

$$\dot{Q}_{CICLO} = 3,3819 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_T = 0,9537 \text{ kW}$$

$$\eta_{CICLO} = 0,282$$

No ciclo Rankine, o diagrama temperatura *versus* entropia é mostrado na figura 92 com os valores resultantes da operação da planta de potência nas condições das variáveis de estados dos pontos indicados.

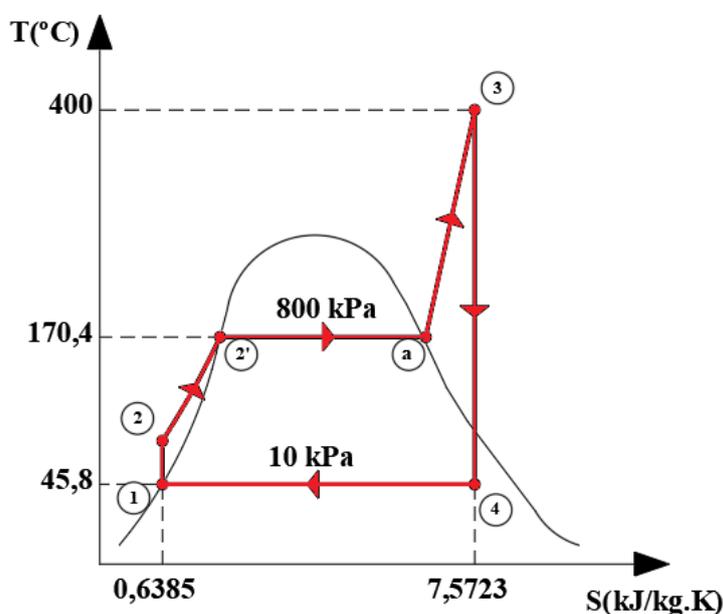


FIGURA 92 – Diagrama T x S do ciclo Rankine.  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O sistema supervisório desenvolvido registrou os valores das temperaturas do ciclo Rankine no período de tempo de operação de 1 hora nos seguintes pontos: entrada do ciclo (figura 93), após o economizador (figura 94), entrada do aquecedor (figura 95), entrada do super-aquecedor (figura 96) e na saída do super-aquecedor (figura 97). Os gráficos a seguir mostram os valores de temperatura obtidos nos pontos citados e também apresentam as faixas de erros superior e inferior consideradas a partir do valor de erro admissível informado no manual do sensor utilizado.

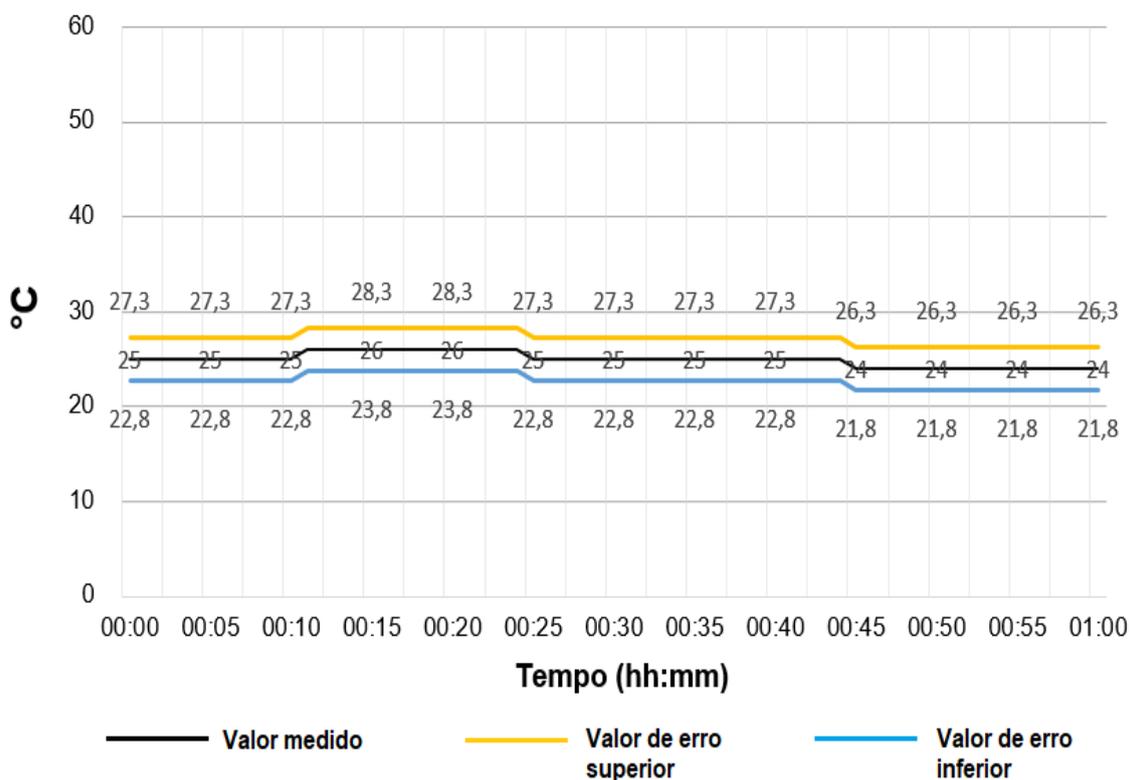


FIGURA 93 – Gráfico com a medição de temperatura da água na entrada do ciclo Rankine ( $T_1$ ) (ponto 1 da figura 80).

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

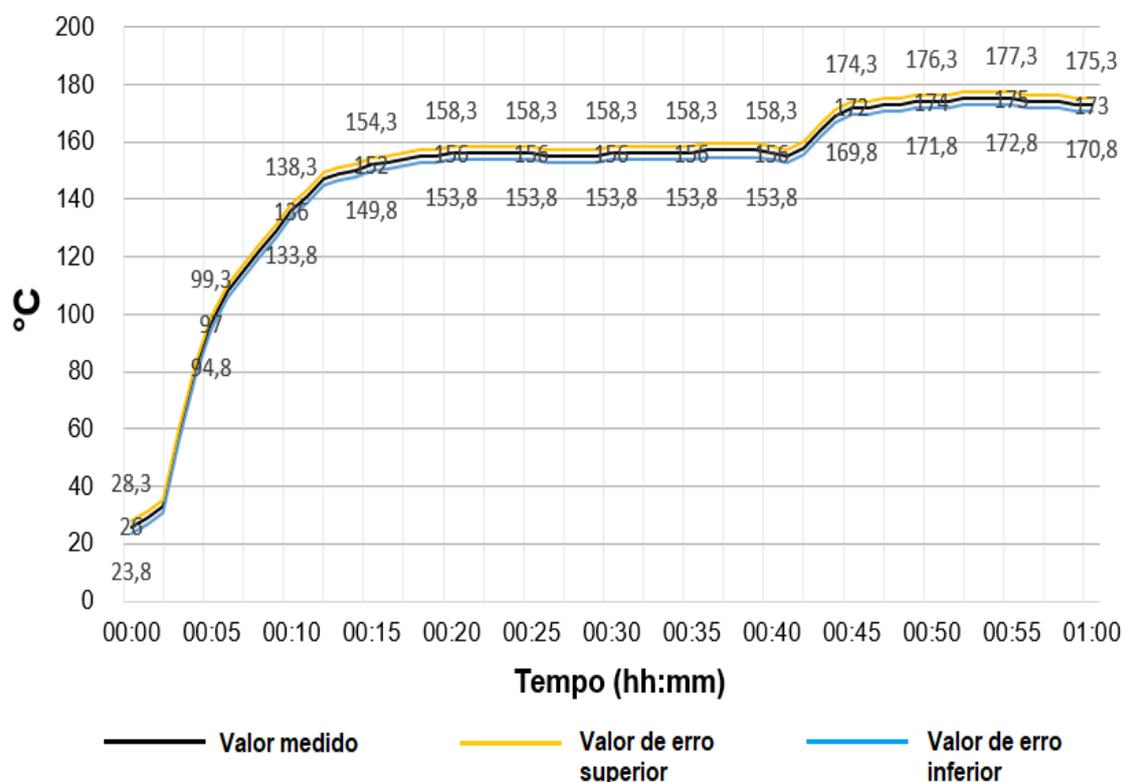


FIGURA 94 – Gráfico com a medição de temperatura após o economizador no ciclo Rankine (ponto 2's da figura 80).

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

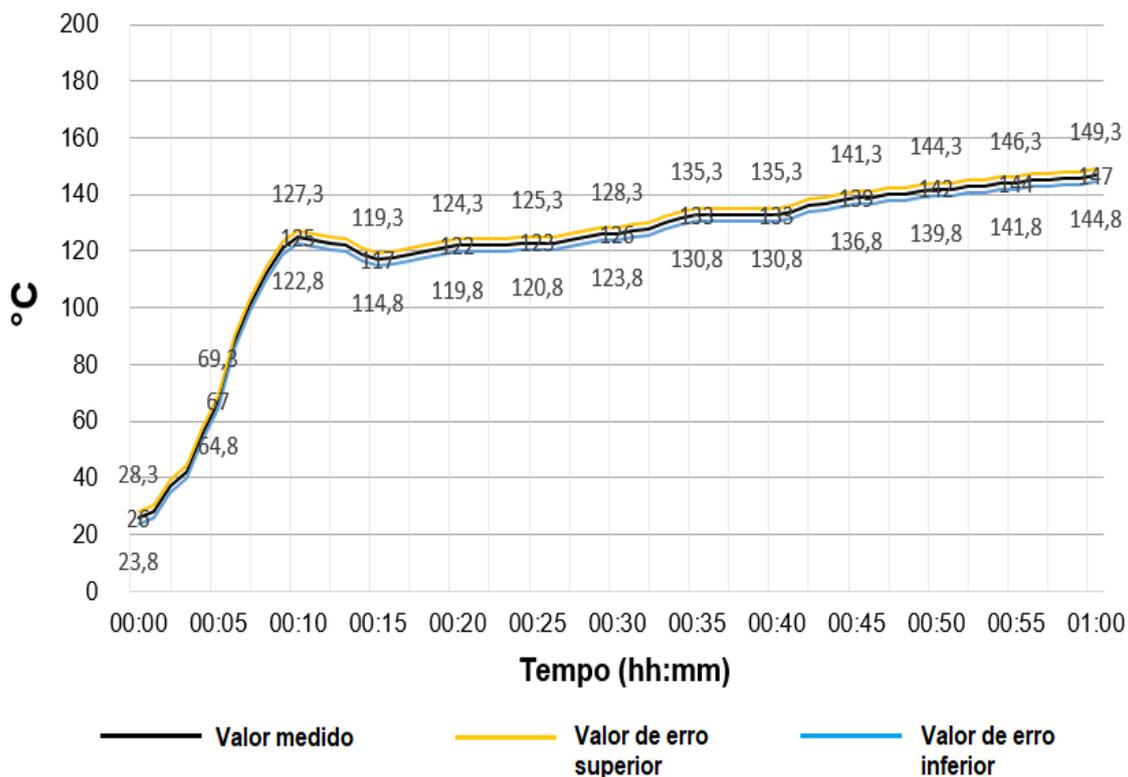


FIGURA 95 – Gráfico com a medição de temperatura na entrada do aquecedor no ciclo Rankine (ponto 2'i da figura 80).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

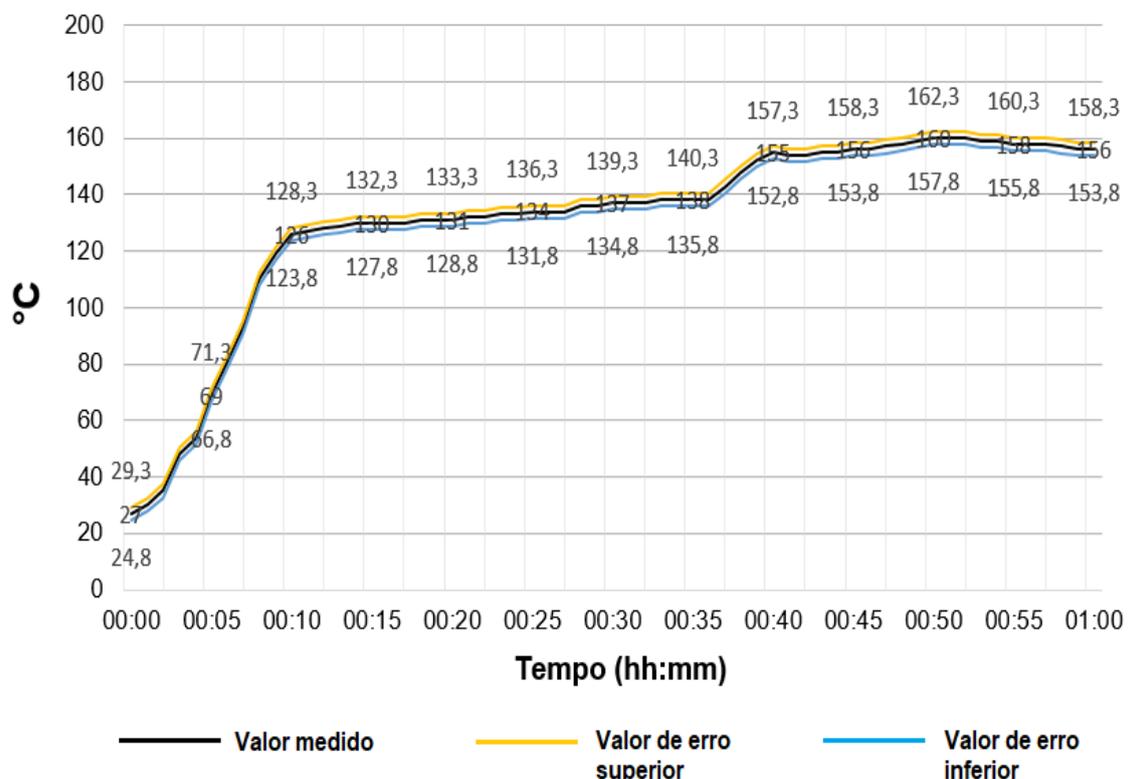


FIGURA 96 – Gráfico com a medição de temperatura na entrada do super-aquecedor no ciclo Rankine (ponto a da figura 80).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

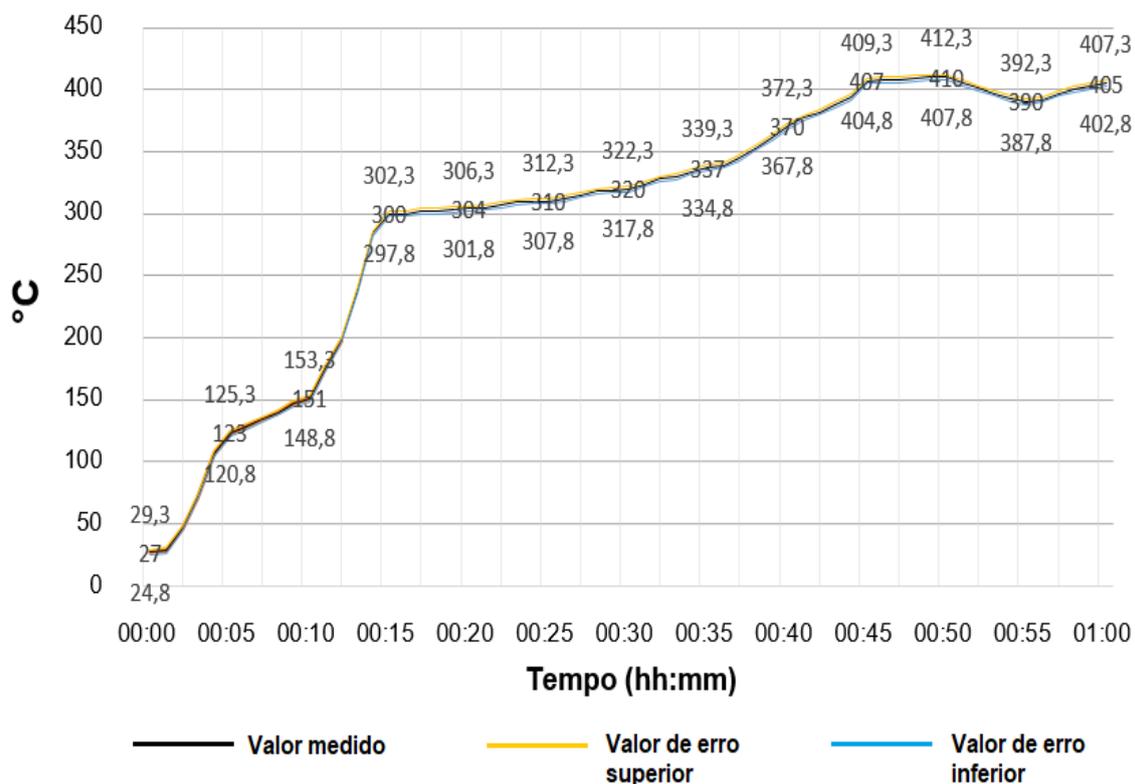


FIGURA 97 – Gráfico com a medição de temperatura na saída do super-aquecedor no ciclo Rankine ( $T_3$ ) (ponto 3 da figura 80).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Ao ciclo Brayton das figuras 73 e 74 aplicam-se as condições iniciais de operação, conforme registrado no período de 1 hora de operação da planta de potência, com os valores médios de temperatura e pressão tirados dos gráficos das figuras 98, 99 e 100, fornecidos pelo monitoramento do programa supervisor. Para as condições  $T_5 = 312 \text{ K}$ ,  $P_5 = 100 \text{ kPa}$  e  $P_6 = 400 \text{ kPa}$  a razão de pressão é igual a 4.

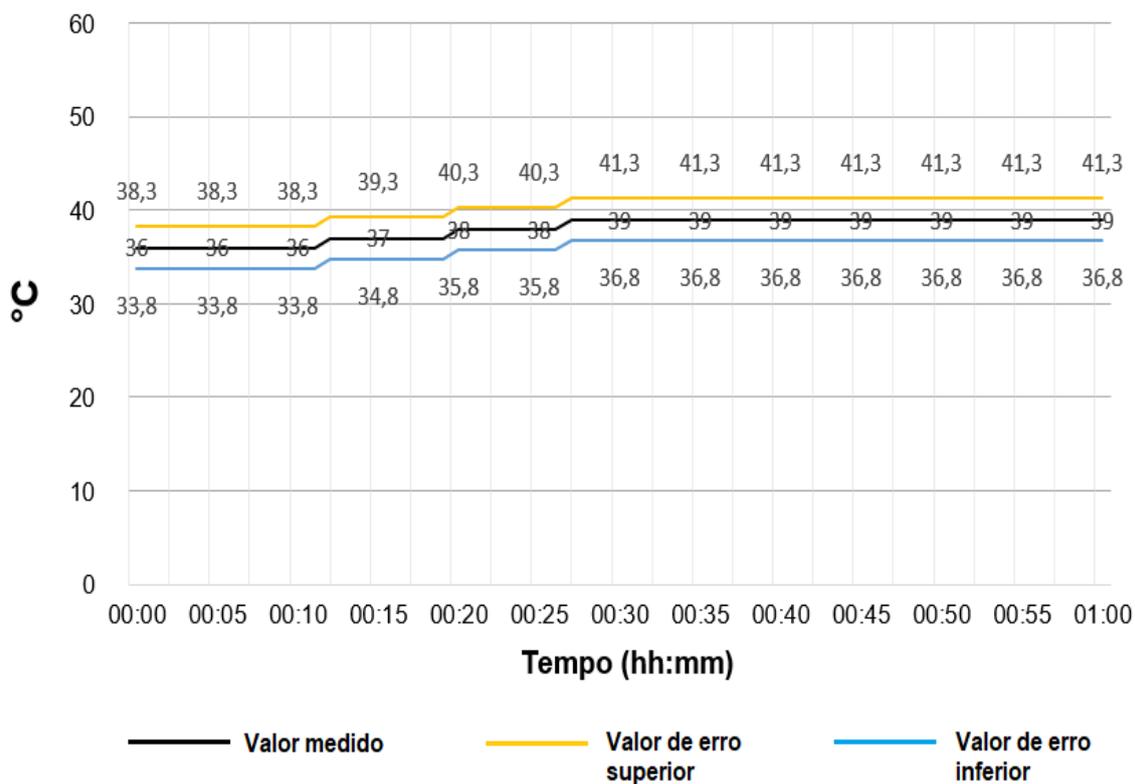


FIGURA 98 – Gráfico com a medição de temperatura do ar na entrada do ciclo Brayton ( $T_5$ ) (ponto 5 da figura 75).

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

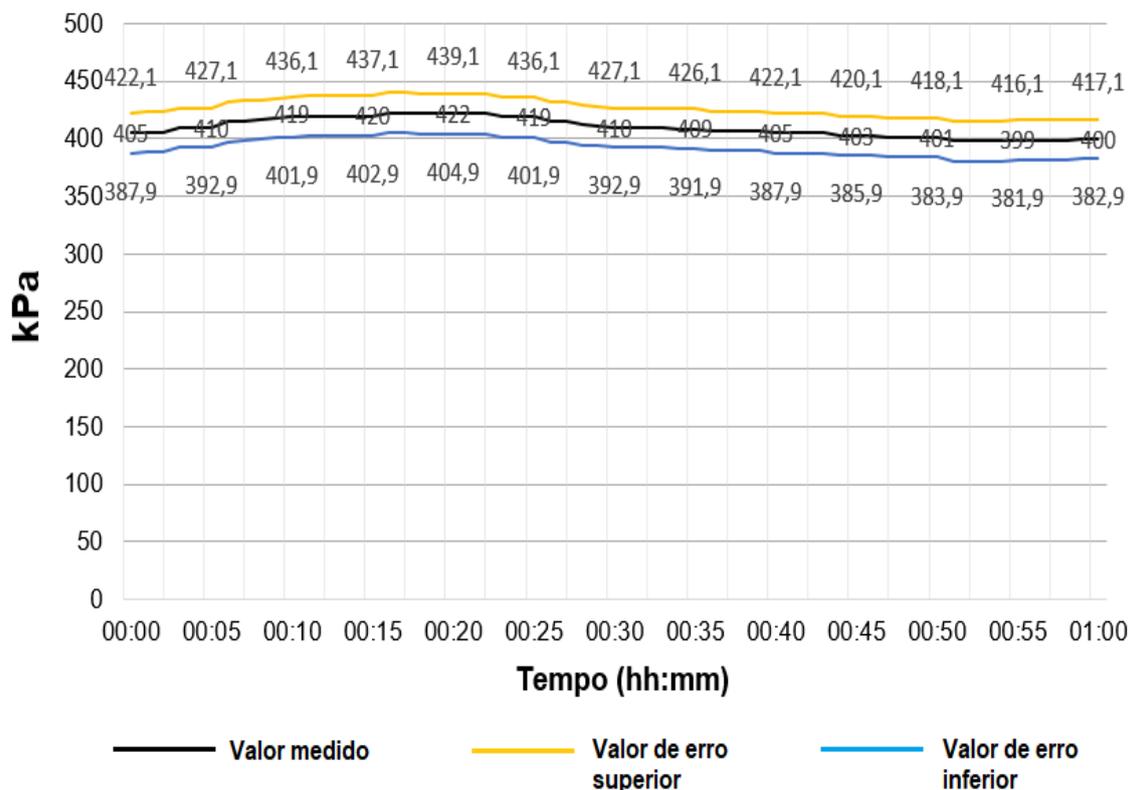


FIGURA 99 – Gráfico com a medição de pressão do ar comprimido na entrada do ciclo Brayton ( $P_6$ ) (ponto 6 da figura 75).

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

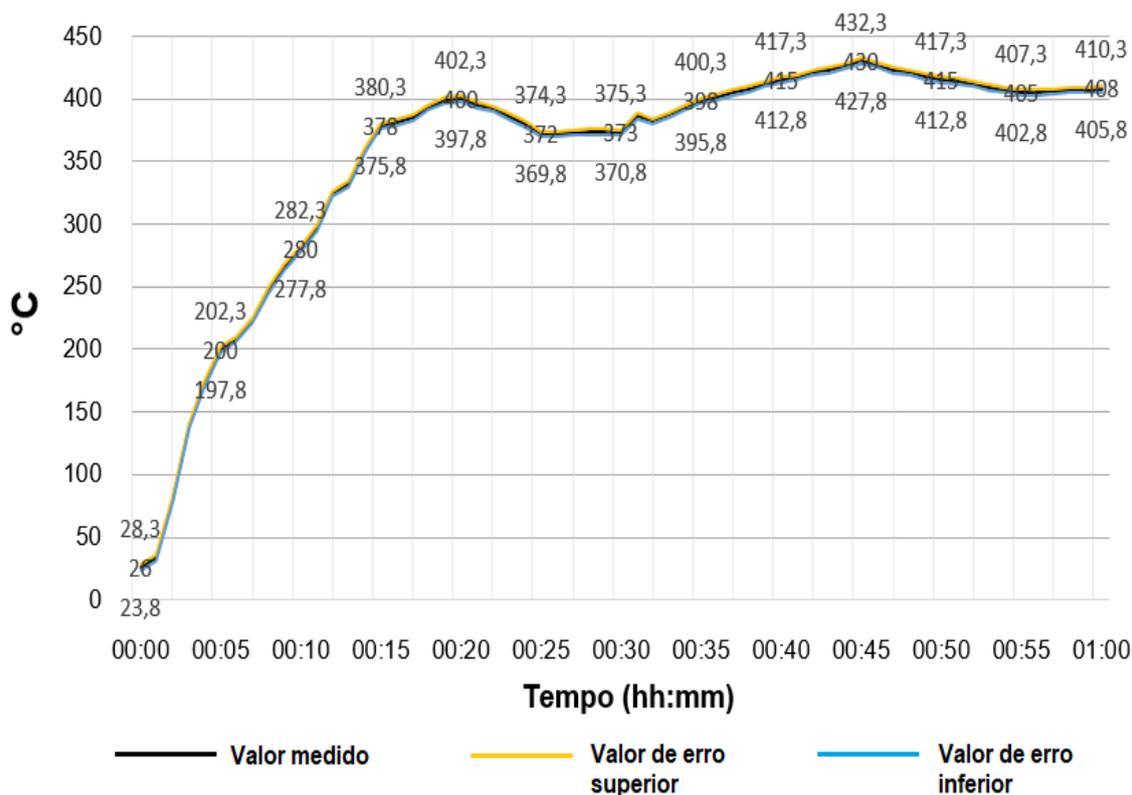


FIGURA 100 – Gráfico com a medição de temperatura dos gases na saída do ciclo Brayton ( $T_8$ ) (ponto 8 da figura 75).

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O fluxo de ar é  $0,7 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $0,0117 \text{ m}^3/\text{s}$ ) com taxa de fluxo de massa  $\dot{m} = 0,014 \text{ kg/s}$ .

As equações (1), (2), (4) e (5) fornecem as temperaturas e trabalho útil gerado, conforme a tabela no anexo G. A razão de pressão que fornece o trabalho útil máximo é dada pela equação (6).

$$r_p \text{ máx.} = \left( \frac{1000}{312} \right)^{1,75} = 7,68$$

A figura 101 representa o gráfico com os valores teóricos de rendimento “ $\eta$ ” versus razão de pressão “ $r_p$ ”, o qual se aproxima assintoticamente para o valor do rendimento de Carnot do ciclo ideal operando entre as temperaturas  $T_5$  e  $T_7$  dado pela equação (7).

$$\eta = 1 - \frac{312}{1000} = 0,688$$

A razão de pressão que corresponde a esse rendimento teórico é:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{K-1}{K}}} = 0,688$$

Que resulta:  $r_p = 58,95 = (7,68)^2 = r_{p \text{ máx}}^2$

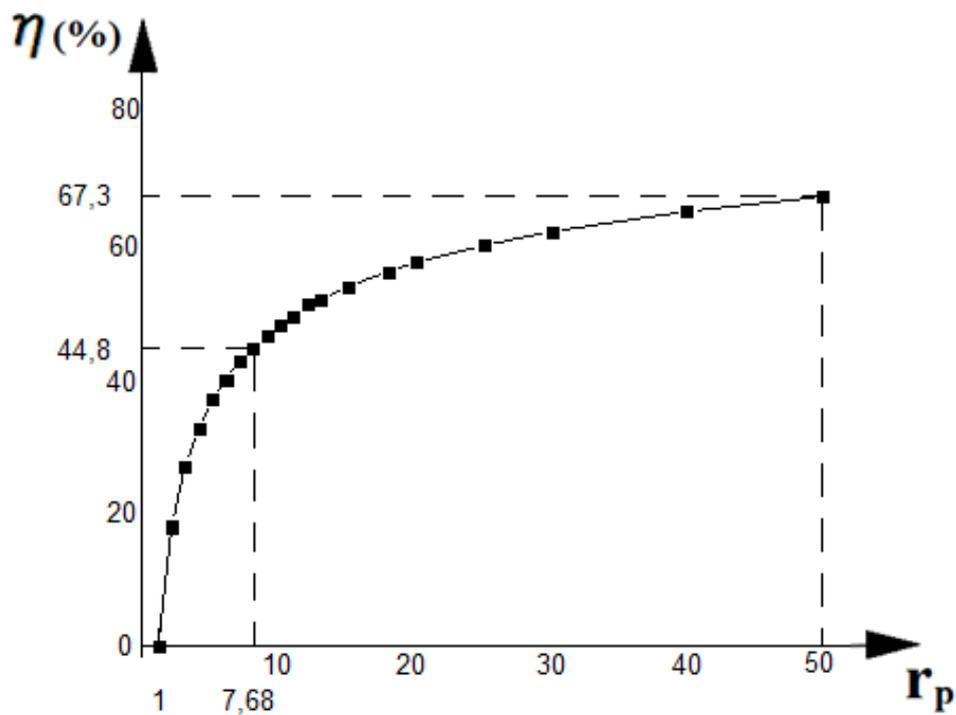


FIGURA 101 – Gráfico com valores teóricos de rendimento  $\eta$  versus razão de pressão  $r_p$ .

FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O gráfico com os valores teóricos de trabalho útil  $\dot{W}_u$  versus a razão de pressão é mostrado na figura 102.

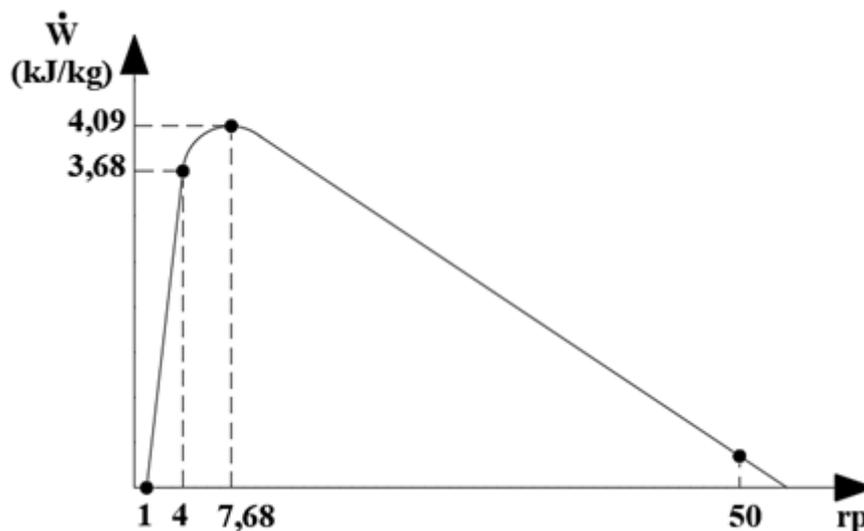


FIGURA 101 – Gráfico com valores teóricos de trabalho útil  $\dot{W}_u$  versus razão de pressão  $r_p$ .  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

O ciclo combinado Brayton-Rankine mostrado nas figuras 81, 82 e 83, operam com a energia dos gases de exaustão nos estado (8) do Brayton, sendo transferido à massa de água do ciclo Rankine, o qual deve fornecer potência de 1kW em operação conjunta.

Os cálculos dos estados térmicos (6), (7) e (8) permitem a obtenção das energias e rendimento do ciclo, conforme tabela disponível no anexo G, bem com mostrados na figura do rendimento versus razão de pressão e do trabalho útil resultante.

O valor máximo do trabalho resultante do ciclo ocorre com a razão de pressão  $r_p = 7,68$  para  $T_5 = 312$  K e  $T_7 = 1000$  K. Contudo, a razão de pressão igual a 4 fornece temperatura no estado 8 no valor de 673,0 K, ainda com o valor de trabalho útil próximo do máximo, todavia disponibilizando um ganho de energia transferida ao ciclo Rankine, correspondente à variação de entalpia igual a

$$\Delta_h = (h_4 - h_7) \times \dot{m}_{ar} = (684,34 - 578,73) \times 0,014 = 1,48 \text{ kJ/kg}$$

No diagrama T x S da figura 82, a temperatura do ponto (2') é a de líquido saturado e a do ponto (9') é a temperatura de saída dos gases da caldeira correspondendo ao “pinch point” do acoplamento térmico dos ciclos. O ponto (9') deve estar a uma temperatura maior do que a do estado (2'), sendo a diferença ( $T_{9'} - T_{2'}$ ) igual ou maior do que 10°C (OBERT; YOUNG, 1962).

$$T_{2'} = (T_{SAT}) \text{ a } 0,8\text{MPa} = 443,4 \text{ K}$$

$$T_{9'} = T_2 + 10 = 453,4 \text{ K}$$

O balanço de energia é:

$$\dot{m}_{vapor} \times (h_3 - h_2) = m_{gás} \times C_P \times (T_8 - T_{9'})$$

Resulta a massa de vapor  $\dot{m}_{vapor}$ :

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{0,021 \times 1 \times (673 - 453,4)}{(3267,1 - 721,1)} = 0,0012 \text{ kg/s}$$

A figura 103 mostra a planta do ciclo combinado com os valores das variáveis de estado e potências determinados pelos parâmetros de projeto ou obtidos através de cálculos.

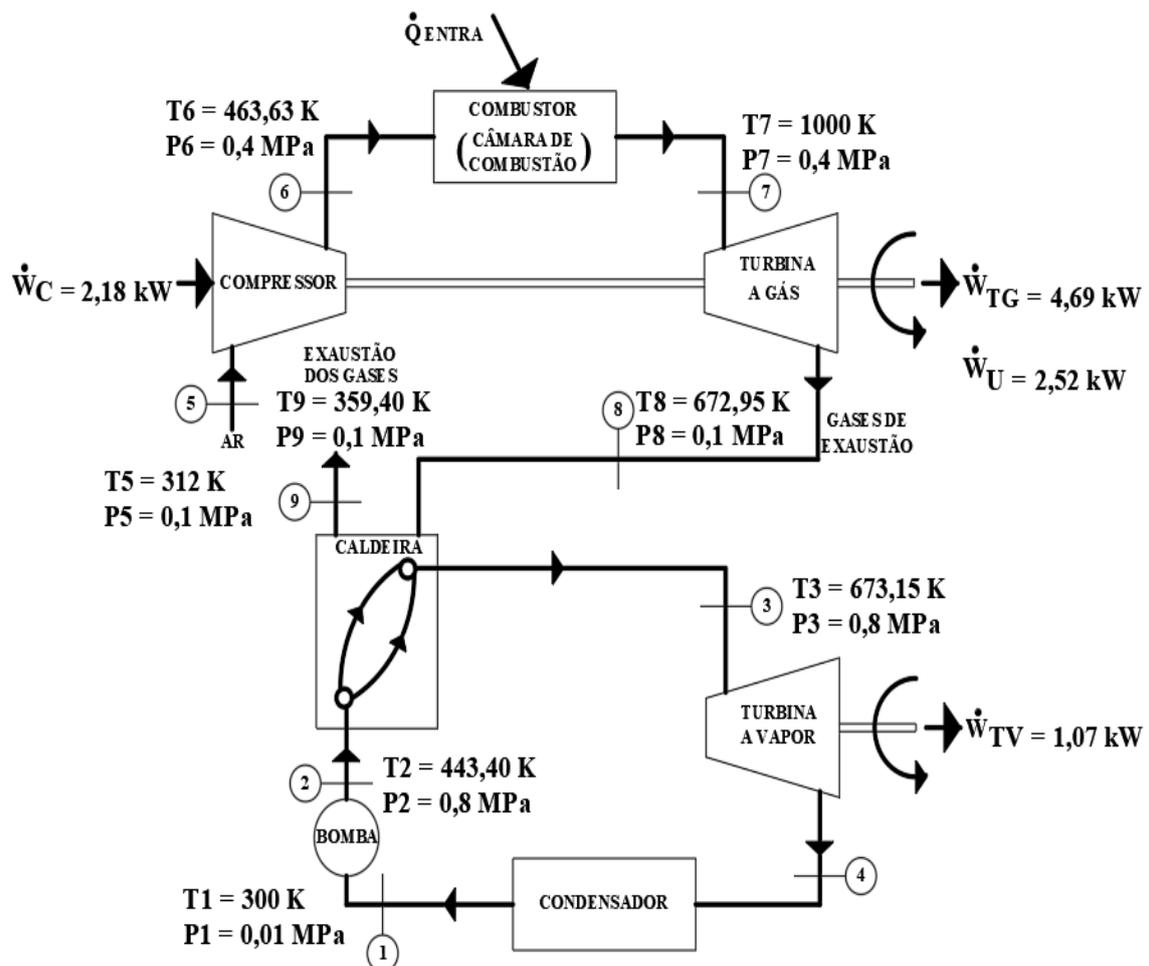


FIGURA 103 – Planta do ciclo combinado com os valores obtidos.  
FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

Nessas condições, os rendimentos individuais e conjuntos são:

$$\eta_{Brayton} = 0,327$$

$$\eta_{Rankine} = 0,282$$

$$\eta_{Brayton-Rankine} = \frac{W_{Brayton} + W_{Rankine}}{Q_{Entra}}$$

$$W_{Brayton} = 2,51 \text{ kW}$$

$$W_{Rankine} = 1,07 \text{ kW}$$

$$Q_{Entra} = 7,72 \text{ kW}$$

$$\eta_{Brayton-Rankine} = \frac{2,51 + 1,07}{7,72} = 0,464$$

A eficiência do ciclo combinado sendo  $\eta = 0,464$  é 64,5% maior do que o do ciclo Rankine e 41,8% maior do que o do ciclo Brayton.

Na entrada da chaminé, o supervisor registrou temperatura média de 180°C conforme figura 104, o que está de acordo com a temperatura de saída dos gases em tiragem natural, prevista no projeto térmico do protótipo, com medidas e forma geométrica da chaminé dimensionadas segundo Manual Técnico Hütte II, deve situar-se no intervalo de temperatura de 175°C à 200°C.

A tabela completa com os históricos de temperatura e pressão gerados pelo supervisor após a realização de um teste de funcionamento da planta de geração de potência pelo período de uma hora está disponível nos anexos H e I.

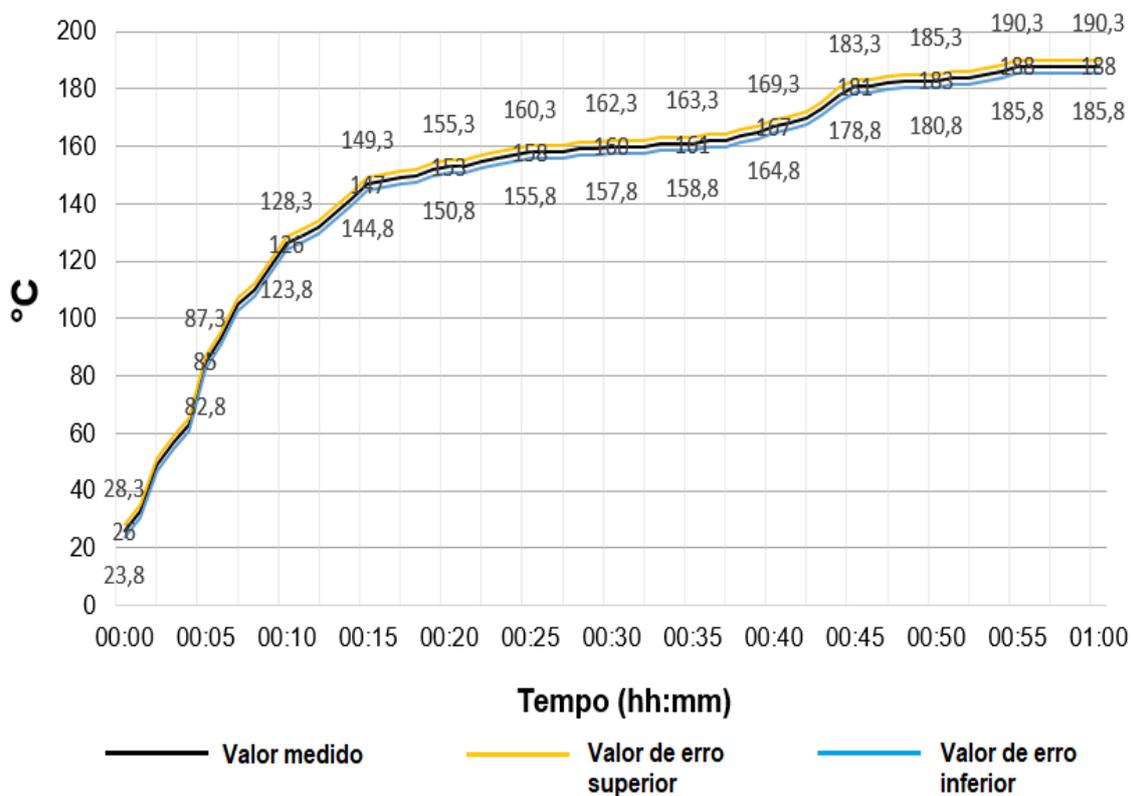


FIGURA 104 – Gráfico com a medição da temperatura dos gases de combustão na região da chaminé (T<sub>9</sub>) (ponto 9 na figura 74).  
 FONTE: Arquivo pessoal, 2019.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia de análise e supervisão do processo de produção de uma planta de geração, em projeto de engenharia e em um ambiente SCADA – Controle de supervisão e aquisição de dados, com o uso do *software* Indusoft Web Studio 8.0.

Os registros gráficos obtidos mostraram resultados de temperatura e pressão em concordância com os resultados teóricos calculados no projeto da planta térmica, atestando a confiabilidade e segurança no uso do *software* desenvolvido.

Em operação, a cada ponto do processo, associado a um estado térmico, foram registrados graficamente em tempo real, os valores de temperatura e pressão, permitindo o monitoramento do comportamento e desempenho térmico dos processos presentes na operação dos ciclos individuais bem como do ciclo combinado.

As placas microcontroladas Arduino Uno mostraram um desempenho satisfatório no processamento dos sinais vindos dos sensores e na transmissão de dados para o supervisor, não apresentando falhas que comprometessem a operação ou a aquisição de dados durante os testes realizados. O fato de ser uma tecnologia com um custo relativamente baixo, aliado à ampla disponibilidade de bibliotecas com códigos-fonte ressalta a vasta aplicabilidade dessa plataforma no desenvolvimento de protótipos na área de automação e controle.

Os módulos MAX485 utilizados apresentaram um desempenho satisfatório na comunicação por protocolo Modbus entre os Arduinos e o supervisor.

O uso das placas de circuito impresso para fixação individual dos Arduinos e seus dispositivos auxiliares mostrou-se bastante prático, pois dispensou o uso de fios nas ligações entre esses componentes, reduzindo as possíveis falhas nas transmissões de dados causadas por mau contato. Por usar módulos individuais funcionando em conjunto, esse sistema permite a ampliação do número de módulos com Arduinos conforme a necessidade de projetos futuros.

Para garantir uma maior praticidade e segurança na operação do protótipo, foram desenvolvidos e testados comandos para executar os procedimentos de ignição, desligamento e monitoramento das chamas nos queimadores.

## REFERÊNCIAS

AIHARA, C. K. et al. **Desenvolvimento de aplicativos para monitoramento de variáveis de controle de processos industriais**. 1ª Escola Brasileira de Aplicações em Dinâmica de Controle, 2001, São Carlos.

ARDUINO. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

B&B ELETRONICS. **RS-485 Connections FAQ Connections for 2-wire or 4-wire**. 2003. Disponível em: <[http://www.bb-elec.com/Learning-Center/All-White-Papers/Serial/RS-485-Connections-FAQ/faq\\_rs485\\_connections.pdf](http://www.bb-elec.com/Learning-Center/All-White-Papers/Serial/RS-485-Connections-FAQ/faq_rs485_connections.pdf)>. Acesso em: 18 dez. 2018.

CAMPOS, M. C.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Editora Edgard Blüncher Ltda. 2006. 396p.

COTTET, F.; GROLLEAU, E. **Systèmes temps reel et implementation de contrôle – commande, conception**. Paris: Dunod, 2005.

ELETROGATE. **Arduino Maker**. 2019. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/pagina/apostilas.html>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

EXONS SOLUTIONS. **Sistemas para Automação**. 2017. Disponível em: <<http://www.exons.com.br/plataformas.php>>. Acesso em: 24 fev. 2019.

FREESCALE. **Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated**. 2012. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5700.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2018.

GONÇALVES, Marcelo Giglio. **Monitoramento e controle de processo**. In: PROGRAMA DE QUALIFICAÇÃO DE OPERADORES, 4. 2003, Brasília. Série Qualificação Básica de Operadores. SENAI – PETROBRAS.

HÜTTE. **Manual del Ingeniero**. Tomo II. 2. Ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili. 1963.

INDUSOFT WEB STUDIO. Disponível em: < <http://www.indusoft.com/>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

KEENAN, J. H. **Thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1941.

KHALIQ, A.; KAUSHIK, S. C. **Thermodynamic performance evaluation of combustion gas turbine cogeneration system with reheat**. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, New Delhi, 2004.

LAKHOUA, M. N. **SCADA applications in thermal power plants**. International Journal of the Physical Sciences, v. 5, pp. 1175 – 1182, 2010.

LAMBERT, M.; RIERA, B.; MARTEL, G. **Application of functional analysis techniques to supervisory systems**. Reliability engineering and system safety n° 64, 1999, pp. 209-224.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter**. 2002. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers**. 2014. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MODICON. **Modbus Protocol Reference Guide (PI-MBUS-300 Rev. J)**. North Andover: Modicon Inc, Industrial Automation Systems. Jun 1996 Manual.

NATIONAL INSTRUMENTS. **The Modbus Protocol In-Depth**. 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/52134/en/>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

OBERT, Edward F.; YOUNG, Robert L. **Elements of Thermodynamics and Heat Transfer**. 2. Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962.

PILLAI, B.; MEHTA, V.; PATEL, N. **Development of Supervisory Control and Data Acquisition system for Laboratory Based Mini Thermal Power Plant using LabVIEW**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2001.

RAJPUT, R. K. **Thermal Engineering**. New Delhi: Laxmi Publications Ltd, 2010.

REYNARD, S.; **Flexible manufacturing Cell SCADA systems for educational purposes**. Comput Education Engineering Education 16, pp. 21 – 30, 2008.

SOUZA, Luiz Cláudio Andrade. **Desenvolvimento de um drive padrão OPC para Controlador Lógico Programável, em ambiente Windows NT**. 1999. 185 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STEVAN JÚNIOR, Sérgio Luiz; SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino, Teoria e Projetos**. São Paulo: Érica, 2015. 296p.

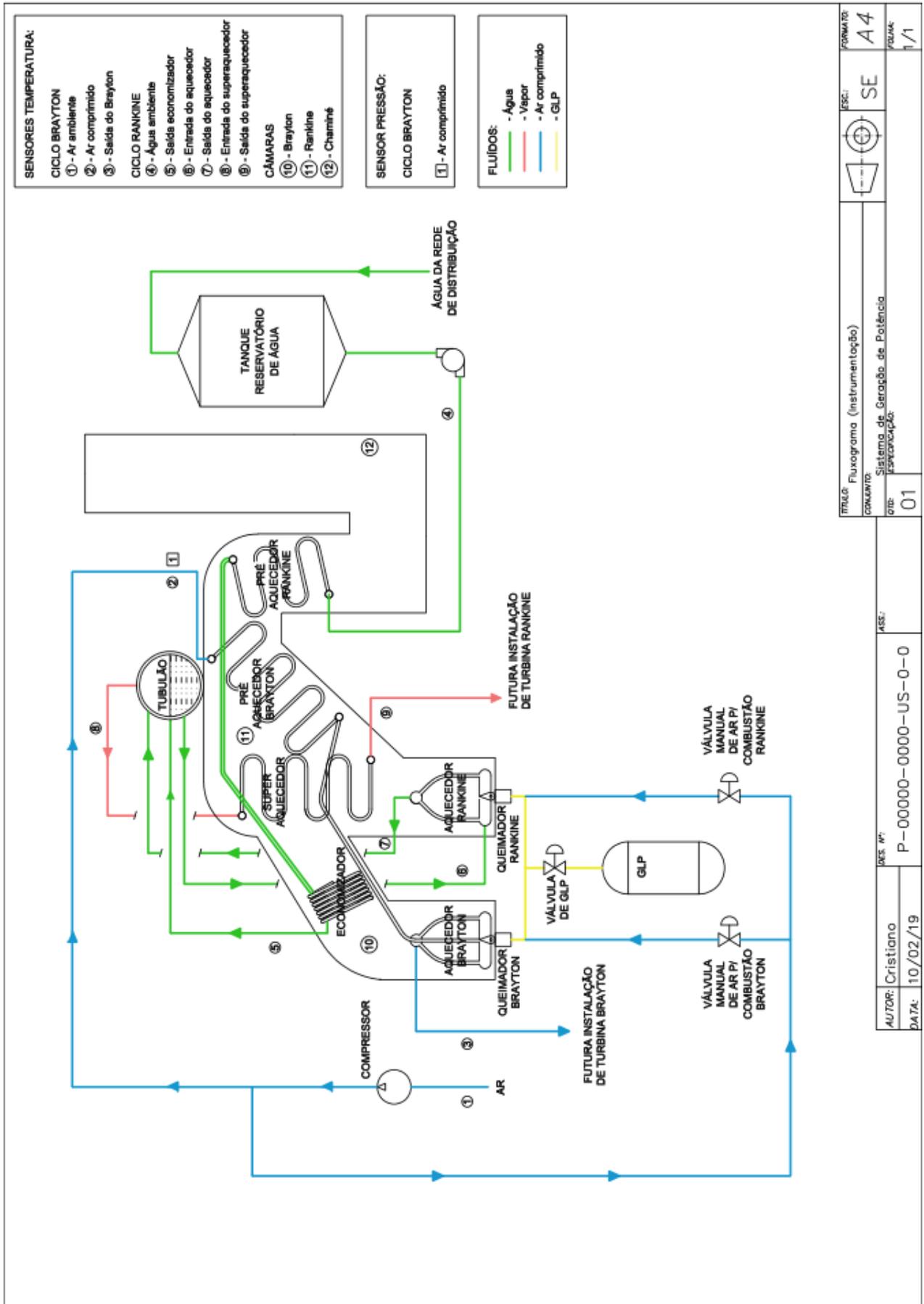
ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2005. 362p.

VALVANO, J. W.; AHMAD, B.; NAYAK J. **Real time data acquisition and control**. Austin: ASEE, 1999.

VAN WYLEN, Gordon et al. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blüncher Ltda. 1994. 560p.

WEG. **Manual do Usuário Modbus TCP**. Jaraguá do Sul: WEG Equipamentos Elétricos S.A. Abr 2013 Manual.

ANEXO A – Fluxograma resumido do protótipo de geração de potência



TÍTULO: Fluxograma (Instrumentação)		FORMATO: A4
CONTO: Sistema de Geração de Potência		ESCALA: SE
OBJ: Instrumentação		FOLHA: 1/1
01		

AUTOR: Cristiano	DES. Nº: P-00000-0000-US-0-0	4ES:
DATA: 10/02/19		

## ANEXO B – Código fonte Arduino 1

```

//ARDUINO 01 - Medição de temperatura dos seguintes pontos:
//CAMARA RANKINE / SAIDA ECONOMIZADOR / ENTRADA AQUECEDOR
//
//-----

#include <max6675.h>
#include "SimpleModbusSlave.h"

unsigned long currentMillis = 0, previousMillis = 0;
unsigned int amostragem = 0;
float temp_termo1 = 0;
float temp_termo2 = 0;
float temp_termo3 = 0;

////////// registers of slave //////////
enum
{
    temp_camara_rankine,
    temp_saida_economizador,
    temp_entrada_aquecedor,

HOLDING_REGS_SIZE
};

int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

//Configuração dos pinos para max6675 temp_camara_rankine
int therm1DO = 11;
int therm1CS = 12;
int therm1CLK = 13;

MAX6675 therm1(therm1CLK, therm1CS, therm1DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_saida_economizador
int therm2DO = 8;
int therm2CS = 9;
int therm2CLK = 10;

MAX6675 therm2(therm2CLK, therm2CS, therm2DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_entrada_aquecedor
int therm3DO = 5;
int therm3CS = 6;
int therm3CLK = 7;

MAX6675 therm3(therm3CLK, therm3CS, therm3DO);

//////////

void setup()
{

```

```
    modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 1, 2, HOLDING_REGS_SIZE,
holdingRegs);
    modbus_update_comms (9600, SERIAL_8N2, 1);

    holdingRegs[temp_camara_rankine] = 0;
    holdingRegs[temp_saida_economizador] = 0;
    holdingRegs[temp_entrada_aquecedor] = 0;
}

void loop()

{currentMillis = millis();

if (currentMillis - previousMillis >= 250)
{
    previousMillis = currentMillis;
    holdingRegs[temp_camara_rankine] = therm1.readCelsius();
    holdingRegs[temp_saida_economizador] = therm2.readCelsius();
    holdingRegs[temp_entrada_aquecedor] = therm3.readCelsius();

}
    modbus_update();}
```

## ANEXO C – Código fonte Arduino 2

```

//ARDUINO 02 - Medição de temperatura dos seguintes pontos:
//SAIDA BRAYTON / SAIDA SUPERAQUECEDOR / AR AMBIENTE
//
//-----

#include <max6675.h>
#include "SimpleModbusSlave.h"

unsigned long currentMillis = 0, previousMillis = 0;
unsigned int amostragem = 0;
float temp_termo4 = 0;
float temp_termo5 = 0;
float temp_termo6 = 0;

////////// registers of slave //////////
enum
{
  temp_saida_brayton,
  temp_saida_superaquedor,
  temp_ar_ambiente,

  HOLDING_REGS_SIZE
};

int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

//Configuração dos pinos para max6675 temp_saida_brayton
int therm4DO = 11;
int therm4CS = 12;
int therm4CLK = 13;

MAX6675 therm4(therm4CLK, therm4CS, therm4DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_saida_superaquedor
int therm5DO = 8;
int therm5CS = 9;
int therm5CLK = 10;

MAX6675 therm5(therm5CLK, therm5CS, therm5DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_ar_ambiente
int therm6DO = 5;
int therm6CS = 6;
int therm6CLK = 7;

MAX6675 therm6(therm6CLK, therm6CS, therm6DO);

//////////

void setup()
{

```

```
    modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 2, 2, HOLDING_REGS_SIZE,
holdingRegs);
    modbus_update_comms (9600, SERIAL_8N2, 2);

    holdingRegs[temp_saida_brayton] = 0;
    holdingRegs[temp_saida_superaquedor] = 0;
    holdingRegs[temp_ar_ambiente] = 0;

}

void loop()
{
    currentMillis = millis();

    if (currentMillis - previousMillis >= 250)
    {
        previousMillis = currentMillis;
        holdingRegs[temp_saida_brayton] = therm4.readCelsius();
        holdingRegs[temp_saida_superaquedor] = therm5.readCelsius();
        holdingRegs[temp_ar_ambiente] = therm6.readCelsius();

    }
    modbus_update();}
```

### ANEXO D – Código fonte Arduino 3

```

//ARDUINO 03 - Medição de temperatura dos seguintes pontos:
//CAMARA BRAYTON / GAS CHAMINE / ENTRADA SUPERAQUECEDOR
//
//-----

#include <max6675.h>
#include "SimpleModbusSlave.h"

unsigned long currentMillis = 0, previousMillis = 0;
unsigned int amostragem = 0;
float temp_termo7 = 0;
float temp_termo8 = 0;
float temp_termo9 = 0;

////////// registers of slave //////////
enum
{
  temp_camara_brayton,
  temp_gas_chamine,
  temp_entrada_superaquecedor,

  HOLDING_REGS_SIZE
};

int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

//Configuração dos pinos para max6675 temp_camara_brayton
int therm7DO = 11;
int therm7CS = 12;
int therm7CLK = 13;

MAX6675 therm7(therm7CLK, therm7CS, therm7DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_gas_chamine
int therm8DO = 8;
int therm8CS = 9;
int therm8CLK = 10;

MAX6675 therm8(therm8CLK, therm8CS, therm8DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_entrada_superaquecedor
int therm9DO = 5;
int therm9CS = 6;
int therm9CLK = 7;

MAX6675 therm9(therm9CLK, therm9CS, therm9DO);

//////////

void setup()
{

```

```
    modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 3, 2, HOLDING_REGS_SIZE,
holdingRegs);
    modbus_update_comms (9600, SERIAL_8N2, 3);

    holdingRegs[temp_camara_brayton] = 0;
    holdingRegs[temp_gas_chamine] = 0;
    holdingRegs[temp_entrada_superaquecedor] = 0;

}

void loop()
{
    currentMillis = millis();

    if (currentMillis - previousMillis >= 250)
    {
        previousMillis = currentMillis;
        holdingRegs[temp_camara_brayton] = therm7.readCelsius();
        holdingRegs[temp_gas_chamine] = therm8.readCelsius();
        holdingRegs[temp_entrada_superaquecedor] = therm9.readCelsius();

    }
    modbus_update();}
```

## ANEXO E – Código fonte Arduino 4

```

//ARDUINO 04 - Medição de temperatura dos seguintes pontos:
//SAIDA AQUECEDOR / AR COMPRIMIDO / AGUA AMBIENTE
//
//-----

#include <max6675.h>
#include "SimpleModbusSlave.h"

unsigned long currentMillis = 0, previousMillis = 0;
unsigned int amostragem = 0;
float temp_termo7 = 0;
float temp_termo8 = 0;
float temp_termo9 = 0;

////////// registers of slave //////////
enum
{
  temp_saida_aquecedor,
  temp_ar_comprimido,
  temp_agua_ambiente,

  HOLDING_REGS_SIZE
};

int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

//Configuração dos pinos para max6675 temp_saida_aquecedor
int therm7DO = 11;
int therm7CS = 12;
int therm7CLK = 13;

MAX6675 therm7(therm7CLK, therm7CS, therm7DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_ar_comprimido
int therm8DO = 8;
int therm8CS = 9;
int therm8CLK = 10;

MAX6675 therm8(therm8CLK, therm8CS, therm8DO);

//Configuração dos pinos para max6675 temp_agua_ambiente
int therm9DO = 5;
int therm9CS = 6;
int therm9CLK = 7;

MAX6675 therm9(therm9CLK, therm9CS, therm9DO);

//////////

void setup()
{

```

```
    modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 4, 2, HOLDING_REGS_SIZE,
holdingRegs);
    modbus_update_comms (9600, SERIAL_8N2, 4);

    holdingRegs[temp_saida_aquecedor] = 0;
    holdingRegs[temp_ar_comprimido] = 0;
    holdingRegs[temp_agua_ambiente] = 0;

}

void loop()
{
    currentMillis = millis();

    if (currentMillis - previousMillis >= 250)
    {
        previousMillis = currentMillis;
        holdingRegs[temp_saida_aquecedor] = therm7.readCelsius();
        holdingRegs[temp_ar_comprimido] = therm8.readCelsius();
        holdingRegs[temp_agua_ambiente] = therm9.readCelsius();

    }

    modbus_update();}
```

## ANEXO F – Código fonte Arduino 5

```

//ARDUINO 05 - Comando sobre os seguintes atuadores:
//CENTELHA / VALVULA GLP / VALVULA AGUA / BOMBA DE AGUA
//
//-----

#include "SimpleModbusSlave.h"

unsigned long currentMillis = 0, previousMillis = 0;
unsigned int amostragem = 0;

// variaveis para o calculo da vazão
volatile int frequencia_vazao; // contagem de pulsos do sensor
float vazao_litros_min; // vazão calculada em litros/minuto
float volume_total_litros; // vazão calculada em litros/minuto
unsigned char sensor_yfs201 = 3; // Input do sensor de vazão
unsigned long currentTime;
unsigned long cloopTime;

////////// registers of slave //////////
enum
{
  BOTAO_CENTELHA,
  BOTAO_VALVULAGLP,
  BOTAO_VALVULAGUA,
  BOTAO_BOMBADAGUA,
  BOTAO_TRANSFERIR_AGUA,
  BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES,
  VALOR_VAZAO,
  LAMPADA_CHAMA_ACESA,
  LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO,
  LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR,
  LAMPADA_AGUA_TRANSFERIDA,
  QTDE_AGUA_TRANSFERIDA,

  HOLDING_REGS_SIZE
};

int holdingRegs[HOLDING_REGS_SIZE];

//Configuração dos pinos
int rele_centelha = 10;
int rele_valvula_glp = 11;
int rele_valvula_agua = 12;
int rele_bomba = 13;
int chave_nivel_70 = 6;
int chave_nivel_80 = 5;

int sensor_ldr_rankine = 8;
int sensor_ldr_brayton = 7;

```

```
////////////////////////////////////
```

```
void setup()
{
  modbus_configure(&Serial, 9600, SERIAL_8N2, 5, 2, HOLDING_REGS_SIZE,
  holdingRegs);

  holdingRegs[BOTAO_CENTELHA] = 0;
  holdingRegs[BOTAO_VALVULAGLP] = 0;
  holdingRegs[BOTAO_VALVULAGUA] = 0;
  holdingRegs[BOTAO_BOMBADAGUA] = 0;
  holdingRegs[BOTAO_TRANSFERIR_AGUA] = 0;
  holdingRegs[VALOR_VAZAO] = 0;
  holdingRegs[BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES] = 0;
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_CHAMA_ACESA] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_AGUA_TRANSFERIDA] = false;
  holdingRegs[QTDE_AGUA_TRANSFERIDA] = 0;

  pinMode(rele_centelha, OUTPUT);
  pinMode(rele_valvula_glp, OUTPUT);
  pinMode(rele_valvula_agua, OUTPUT);
  pinMode(rele_bomba, OUTPUT);
  pinMode(chave_nivel_70, INPUT);
  pinMode(chave_nivel_80, INPUT);
  pinMode(sensor_ldr_rankine, INPUT);
  pinMode(sensor_ldr_brayton, INPUT);
  pinMode(sensor_yfs201, INPUT);

  digitalWrite(sensor_yfs201, HIGH);
  digitalWrite(rele_centelha, HIGH);
  digitalWrite(rele_valvula_glp, HIGH);
  digitalWrite(rele_valvula_agua, HIGH);
  digitalWrite(rele_bomba, HIGH);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor_yfs201), flow, RISING);
  sei();
  currentTime = millis();
  cloopTime = currentTime;
}

void loop() {
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_CHAMA_ACESA] = false;
  holdingRegs[LAMPADA_AGUA_TRANSFERIDA] = false;

  modbus_update();
  delay(100);
  currentMillis = millis();

  //////////////////////////////////partida automática
```

```

if (holdingRegs[BOTAO_TRANSFERIR_AGUA] == 1) {

    digitalWrite(rele_valvula_agua, LOW);

    // Verificar estado das 2 chaves de nível
    while ((digitalRead(chave_nivel_70) == HIGH | digitalRead(chave_nivel_80) == HIGH) &
holdingRegs[BOTAO_TRANSFERIR_AGUA] == 1) {
        modbus_update();
    }
    digitalWrite(rele_valvula_agua, HIGH);
    digitalWrite(rele_bomba, LOW);

    while (verificarQuantidadeDeAguaTransferia(1.0) &
(holdingRegs[BOTAO_TRANSFERIR_AGUA] == 1)) {
        modbus_update();
    }
    volume_total_litros = 0;
    holdingRegs[LAMPADA_AGUA_TRANSFERIDA] = true;
    holdingRegs[VALOR_VAZAO] = 0.0;

    modbus_update();
    // Contagem atingida
    digitalWrite(rele_bomba, HIGH);
    //FIM DO CICLO DE ATIVAMENTO DA MONITORAMENTO DA AGUA
    while (holdingRegs[BOTAO_TRANSFERIR_AGUA] == 1) {
        modbus_update();
    }

    holdingRegs[QTDE_AGUA_TRANSFERIDA] = 0.0;
    digitalWrite(rele_valvula_agua, HIGH);
    digitalWrite(rele_bomba, HIGH);

    modbus_update();
}
int tentativas_acendimento = 0;
boolean chama_apagou = false;

// Controle do acendimento das chamas
if (holdingRegs[BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES] == 1) {

    tentativas_acendimento = 0;

    digitalWrite(rele_valvula_glp, LOW);

    acenderCentelha(200);

    while ((digitalRead(sensor_ldr_rankine) == HIGH & digitalRead(sensor_ldr_brayton) ==
HIGH) & tentativas_acendimento < 2) {
        tentativas_acendimento++;
        acenderCentelha(200);
    }

    if (tentativas_acendimento >= 2) {
        digitalWrite (rele_valvula_glp, HIGH);
        holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO] = true;

```

```

modbus_update();
while (holdingRegs[BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES] == 1) {
  modbus_update();
}
holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NA_IGNICAO] = false;
modbus_update();

} else {
  delay(1500);
  //Monitoramento das chamadas
  while ((digitalRead(sensor_ldr_rankine) == LOW) & (digitalRead(sensor_ldr_brayton) ==
LOW) & (holdingRegs[BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES] == 1)) {
    holdingRegs[LAMPADA_CHAMA_ACESA] = true;
    digitalWrite(rele_valvula_glp, LOW);

    modbus_update();
  }

  digitalWrite(rele_valvula_glp, HIGH);
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR] = true;
  holdingRegs[LAMPADA_CHAMA_ACESA] = false;
  modbus_update();

  while (holdingRegs[BOTAO_CHAMA_NOS_QUEIMADORES] == 1) {
    modbus_update();
  }
  holdingRegs[LAMPADA_FALHA_NO_QUEIMADOR] = false;
  modbus_update();
}
}

//////////essa é parte manual

if (holdingRegs[BOTAO_CENTELHA] == 1)
{
  digitalWrite (rele_centelha, LOW);
}
else
{ digitalWrite (rele_centelha, HIGH);
}

if (holdingRegs[BOTAO_VALVULAGLP] == 1)
{
  digitalWrite (rele_valvula_glp, LOW);
}
else
{ digitalWrite (rele_valvula_glp, HIGH);
}

if (holdingRegs[BOTAO_VALVULAGUA] == 1)
{
  digitalWrite (rele_valvula_agua, LOW);
}
else
{ digitalWrite (rele_valvula_agua, HIGH);
}

```

```

}

if (holdingRegs[BOTAO_BOMBADAGUA] == 1)

{
    digitalWrite (rele_bomba, LOW);

}
else
{ digitalWrite (rele_bomba, HIGH);
}

}

boolean verificarQuantidadeDeAguaTransferia(float maxLitrosTransferir) {
    monitorarVazao();
    return (volume_total_litros <= maxLitrosTransferir);
}

boolean verificarNivelChaves() {
    return (digitalRead(chave_nivel_70) == LOW || digitalRead(chave_nivel_80) == LOW);
}

void acenderCentelha(unsigned long milisegundos) {
    digitalWrite (rele_centelha, LOW);
    delay(milisegundos);
    digitalWrite (rele_centelha, HIGH);
    delay(100);
}

boolean verificarChamas() {
    return (digitalRead(sensor_ldr_brayton ) == HIGH && digitalRead(sensor_ldr_rankine) ==
HIGH);
}

void flow () {
    frequencia_vazao++;
}

void monitorarVazao() {
    currentTime = millis();

    // calcula a cada segundo
    if (currentTime >= (cloopTime + 1000))
    {
        detachInterrupt(sensor_yfs201);
        cloopTime = currentTime;
        vazao_litros_min = frequencia_vazao / 7.5; // vazão em litros/min
        volume_total_litros += vazao_litros_min / 60;
        holdingRegs[VALOR_VAZAO] = vazao_litros_min;
        holdingRegs[QTDE_AGUA_TRANSFERIDA] = volume_total_litros;

        frequencia_vazao = 0;
        attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor_yfs201), flow, RISING);
    }
}

```

```
}  
modbus_update();  
}
```

**ANEXO G – Tabela com resultados: ciclo Brayton\***

$r_p$	$T_6$ (K)	$T_8$ (K)	$\dot{W}_C$ (J/kg.s)	$\dot{W}_T$ (J/kg.s)	$\dot{Q}$ (J/s)	$\dot{W}_U$ (J/s)	$\eta$ (%)
1	312,00	312,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	380,33	820,34	0,98	2,58	8,89	1,60	17,97
3	427,05	730,60	1,65	3,87	8,22	2,21	26,94
4	463,63	672,95	2,18	4,69	7,70	2,52	32,70
5	494,15	631,39	2,61	5,29	7,26	2,68	36,86
6	520,58	599,34	2,99	5,75	6,88	2,76	40,07
7	544,02	573,51	3,33	6,12	6,54	2,79	42,65
8	565,17	552,04	3,63	6,43	6,24	2,80	44,80
9	584,51	533,78	3,91	6,69	5,96	2,78	46,62
10	602,38	517,95	4,17	6,92	5,71	2,75	48,21
11	619,01	504,03	4,41	7,12	5,47	2,71	49,60
12	634,59	491,66	4,63	7,29	5,24	2,67	50,83
13	649,27	480,54	4,84	7,45	5,03	2,61	51,95
15	676,36	461,29	5,23	7,73	4,64	2,50	53,87
18	712,53	437,88	5,75	8,07	4,13	2,32	56,21
20	734,31	424,89	6,06	8,25	3,81	2,19	57,51
25	782,65	398,65	6,75	8,63	3,12	1,88	60,14
30	824,50	378,41	7,35	8,92	2,52	1,57	62,16
40	895,13	348,55	8,37	9,35	1,50	0,98	65,14
50	954,06	327,02	9,21	9,66	0,66	0,44	67,30

\* Resultados fornecidos pela aplicação das equações (1), (2), (4), (5) e (6).

**ANEXO H – Histórico de medições gerado pelo supervisorio (parte 1)**

HORA	Temperatura (°C)				Pressão (kPa)
	Entrada Brayton	Saída Brayton	Entrada Rankine	Após Economiz.	Entrada Brayton
00:00	36	26	25	26	405
00:01	36	34	25	29	406
00:02	36	80	25	33	406
00:03	36	139	25	59	410
00:04	36	172	25	81	410
00:05	36	200	25	97	410
00:06	36	208	25	108	415
00:07	36	223	25	115	416
00:08	36	248	25	122	417
00:09	36	265	25	129	418
00:10	36	280	25	136	419
00:11	36	297	26	141	420
00:12	37	324	26	147	420
00:13	37	332	26	149	420
00:14	37	359	26	150	420
00:15	37	378	26	152	420
00:16	37	381	26	153	423
00:17	37	385	26	154	423
00:18	37	393	26	155	422
00:19	37	399	26	155	422
00:20	38	400	26	156	422
00:21	38	395	26	156	422
00:22	38	392	26	156	422
00:23	38	386	26	156	419
00:24	38	380	26	156	419
00:25	38	372	25	156	419
00:26	38	372	25	155	415
00:27	39	373	25	155	415
00:28	39	374	25	155	412
00:29	39	374	25	155	411
00:30	39	373	25	156	410
00:31	39	386	25	156	410
00:32	39	382	25	156	410
00:33	39	387	25	156	410
00:34	39	393	25	156	409
00:35	39	398	25	156	409
00:36	39	401	25	157	407
00:37	39	405	25	157	407
00:38	39	408	25	157	407
00:39	39	412	25	157	407
00:40	39	415	25	156	405
00:41	39	417	25	155	405
00:42	39	421	25	158	405
00:43	39	423	25	164	405
00:44	39	426	25	169	403
00:45	39	430	24	172	403
00:46	39	427	24	172	403

00:47	39	423	24	173	401
00:48	39	421	24	173	401
00:49	39	418	24	174	401
00:50	39	415	24	174	401
00:51	39	414	24	174	398
00:52	39	412	24	175	398
00:53	39	409	24	175	398
00:54	39	407	24	175	398
00:55	39	405	24	175	399
00:56	39	405	24	174	399
00:57	39	406	24	174	399
00:58	39	407	24	174	399
00:59	39	407	24	173	400
01:00	39	408	24	173	400

**ANEXO I – Histórico de medições gerado pelo supervisorio (parte 2)**

HORA	Temperatura (°C)			
	Saída Aquecedor	Entrada Superaquecedor	Saída Superaquecedor	Região Chaminé
00:00	26	27	27	26
00:01	28	30	29	33
00:02	37	35	47	49
00:03	42	48	72	57
00:04	55	54	107	63
00:05	67	69	123	85
00:06	88	81	128	93
00:07	101	93	134	105
00:08	112	110	140	110
00:09	121	119	147	118
00:10	125	126	151	126
00:11	124	127	175	129
00:12	123	128	198	132
00:13	122	129	239	137
00:14	119	130	284	142
00:15	117	130	300	147
00:16	118	130	300	148
00:17	119	130	302	149
00:18	120	131	302	150
00:19	121	131	303	152
00:20	122	131	304	153
00:21	122	132	305	153
00:22	122	132	307	155
00:23	122	133	309	156
00:24	123	133	310	157
00:25	123	134	310	158
00:26	123	134	312	158
00:27	124	134	315	158
00:28	125	136	318	159
00:29	126	136	319	159
00:30	126	137	320	160
00:31	127	137	324	160
00:32	128	137	328	160
00:33	130	138	330	161
00:34	132	138	334	161
00:35	133	138	337	161
00:36	133	138	339	162
00:37	133	143	345	162
00:38	133	148	353	164
00:39	133	152	361	165
00:40	133	155	370	167
00:41	134	154	377	168
00:42	136	154	382	170
00:43	137	155	388	173
00:44	138	155	394	178
00:45	139	156	407	181
00:46	139	156	408	181

00:47	140	157	408	182
00:48	140	158	409	183
00:49	141	159	410	183
00:50	142	160	410	183
00:51	142	160	405	184
00:52	143	160	401	184
00:53	143	159	397	185
00:54	144	159	393	186
00:55	144	158	390	188
00:56	145	158	392	188
00:57	145	158	397	188
00:58	146	157	400	188
00:59	146	156	403	188
01:00	147	156	405	188