



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Jaisson Vidal

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM REATOR PARA REFORMA
AUTO TÉRMICA DE ETANOL**

Joinville
2023

Jaisson Vidal

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM REATOR PARA REFORMA
AUTO TÉRMICA DE ETANOL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.
Orientador Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.

Joinville
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vidal, Jaisson

Projeto, desenvolvimento e validação de um reator para
reforma auto térmica de etanol / Jaisson Vidal ;
orientador, Rafael de Camargo Catapan, 2023.
122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Reforma auto
térmica. . 3. Etanol. . 4. Hidrogênio. . 5. Monólito
catalítico.. I. Catapan, Rafael de Camargo . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Jaisson Vidal

**PROJETO, DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM REATOR PARA REFORMA
AUTO TÉRMICA DE ETANOL**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leonel Rincon Cancino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Wolf Francisco Jr., Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que
foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências
Mecânicas.

Prof. Wagner Maurício Pachekoski, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.
Orientador

Joinville, 27 de Janeiro de 2023.

Este trabalho é dedicado a todos que acreditam na
ciência.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por proporcionarem a minha existência e por toda a educação concedida. A todos da família por contribuírem direta ou indiretamente nesta trajetória. Aos meus avós, que tiveram enorme contribuição na pessoa que me tornei.

À Gabriele por todo o companheirismo, apoio e carinho nas fases boas e difíceis dessa caminhada.

Ao meu tio Maurino (*in memoriam*) que participou da formação do meu caráter. Um dia eu te encontro por aí.

Ao professor Rafael Catapan, Dr. por toda a orientação, os ensinamentos, os esclarecimentos e os incentivos nas horas de desânimo.

A todos os integrantes do Laboratório de Combustão e Catálise (LAC), da UFSC - Campus Joinville, amigos que levarei para sempre. À Maíra e ao Mauro pelos valiosos ensinamentos de Engenharia Química, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Hamada por compartilhar toda sua habilidade em Python. Ao César pela parceria de sempre. A todos os demais integrantes do LAC, que de forma direta ou indiretamente contribuíram para esta pesquisa. E em especial ao Vinícius Nomura, que me acompanhou e auxiliou em todos os testes, nos desenhos técnicos e nas montagens, e à Jéssica Zeitoune pelo desenvolvimento e preparo das espumas catalíticas utilizadas no trabalho, obrigado.

A todos os professores da UFSC Joinville que tive contato durante as disciplinas, em especial ao Kleber, à Talita e ao Fabiano, pela simplicidade em transmitir o conhecimento, muito obrigado.

Ao suporte financeiro fornecido Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - Fundep - Programa Rota 2030/Linha V (Projeto 27192.01.01/2020.01-00).

A todos que de alguma forma contribuíram neste trabalho, embora não citados nominalmente.

*“O primeiro pecado da humanidade foi a fé; a primeira virtude foi a dúvida.”
(Carl Sagan)*

RESUMO

Dado o crescimento do consumo de energia no mundo e à poluição decorrente da utilização de combustíveis de origem fóssil, há uma enorme demanda por tecnologias mais eficientes e menos poluentes, controlando assim os níveis atmosféricos de dióxido de carbono (CO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Diferentes alternativas têm sido estudadas tais como o uso de biocombustíveis, por exemplo, etanol e biodiesel, em processos de combustão e células de combustível. Tendo em vista este cenário, o principal objetivo deste trabalho é o projeto, construção e validação de uma bancada experimental para testes de reforma auto térmica de etanol e geração de gases ricos em H_2 , incluindo sistemas de controle de alimentação de reagentes e controle de temperatura. A bancada experimental conta com sistemas de aquecimento tanto de ar reagente quanto da região de reforma, com controle automatizado de temperatura. A alimentação de etanol e água foram feitas com um sistema baseado em um bico injetor automotivo controlado por um circuito PWM. Conta com uma região de evaporação onde reagentes gasosos e líquidos entram em contato em contra corrente, a fim de promover uma melhor evaporação da mistura água/etanol. Um sistema de controle foi desenvolvido para que o sistema opere de forma contínua e em regime permanente. A bancada conta ainda com um reator com uma seção de testes para monólitos de até 120 mm de comprimento e 80 mm de diâmetro. O catalisador utilizado no trabalho foi composto de um monólito a base de $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Foi analisado o tempo de aquecimento do sistema até as temperaturas de reforma, bem como a capacidade de evaporação do sistema em diferentes vazões e temperaturas. Foram também avaliadas as conversões de etanol e seletividade do catalisador, em razões Água/Etanol (S/E) de 1,5:1 e Oxigênio/Etanol (O/E) de 0,5:1, nas temperaturas de 500 °C a 700 °C. O tempo obtido para a inicialização de todo o sistema (aquecimento) foi entre 25 e 35 minutos, dependendo da temperatura de reforma pretendida. As frações molares de hidrogênio (H_2) obtidas nos gases reformados foram de 7%, 41% e 32%, correspondendo às temperaturas de reforma de 500 °C, 600 °C e 700 °C, respectivamente. A maior eficiência térmica do sistema reformador foi de 26%, correspondendo a uma temperatura de reforma de 600 °C.

Keywords: Reforma auto térmica. Etanol. Hidrogênio. Monólito catalítico. $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

ABSTRACT

Given the growth of energy consumption in the world and the pollution resulting from the use of fossil fuels, there is a huge demand for more efficient and less polluting technologies, thus controlling atmospheric levels of carbon dioxide (CO₂) and nitrogen oxides (NO_x). Different alternatives have been studied such as the use of biofuels, for example, ethanol and biodiesel, in combustion processes and fuel cells. Because this scenario, the main objective of this work is the design, construction and validation of an experimental bench for testing the autothermal reform of ethanol and the generation of gases rich in H₂, including reagent feed control systems and temperature control. The experimental bench has heating systems for both the reagents air and the reforming region, with automated temperature control. Ethanol and water were fed with a system based on an automotive injector controlled by a PWM circuit. It has an evaporation region where gaseous and liquid reagents come into contact with the current, in order to promote better evaporation of the water/ethanol mixture. A control system was developed so that the system operates continuously and in a steady state. The bench also has a reactor with a test section for monoliths up to 120 mm in length and 80 mm in diameter. The catalyst used in the work was composed of a monolith based on Ni/Al₂O₃. The heating time of the system until the reforming temperatures was analyzed, as well as the evaporation capacity of the system at different flow rates and temperatures. Ethanol conversions and catalyst selectivity were also evaluated, in Water/Ethanol (S/E) ratios of 1.5:1 and Oxygen/Ethanol (O/E) ratios of 0.5:1, at temperatures of 500 °C and 700 °C. The time obtained for the initialization of the entire system (heating) was between 25 and 35 minutes, depending on the desired reform temperature. The molar fractions of hydrogen (H₂) obtained in the reformed gases were 7%, 41% and 32%, corresponding to the reforming temperatures of 500 °C, 600 °C and 700 °C, respectively. The highest thermal efficiency of the reformer system was 26%, corresponding to a reform temperature of 600 °C.

Palavras-chave: Ethanol reforming. Ethanol. Hydrogen. Catalytic Monolith. Ni/Al₂O₃.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de um reator para reforma de etanol.	21
Figura 2 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 5.	27
Figura 3 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 7.	28
Figura 4 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 12.	29
Figura 5 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 14.	30
Figura 6 – Representação esquemática do experimento proposto.	34
Figura 7 – Croquis das formas de fixação dos tampos empregadas neste projeto.	40
Figura 8 – Vista em corte do sistema reformador, identificando: o módulo de aquecimento do ar, o módulo de evaporação e reator.	40
Figura 9 – Representação esquemática de um sistema de condução em um cilindro isolado.	43
Figura 10 – Espuma Al_2O_3 sem impregnação.	49
Figura 11 – Espuma Al_2O_3 sem impregnação, para homogeneização.	50
Figura 12 – Espuma Al_2O_3 com impregnação de Níquel.	50
Figura 13 – Identificação das partes e dos sistemas de controle da bancada.	54
Figura 14 – Coeficiente convectivo no escoamento sobre as espumas porosas no reator em função da temperatura de reforma.	65
Figura 15 – Fração molar de equilíbrio da reforma auto térmica do etanol sob diferentes temperaturas, com razões Vapor/Etanol (S/E) = 1,5:1 e Oxigênio/Etanol (O/E) = 0,5:1, e pressão de 1 atm.	69
Figura 16 – Composição dos produtos por mol de etanol na alimentação em uma reforma auto térmica, com razões S/E = 1,5 e O/E = 0,5, e pressão de 1 atm.	70
Figura 17 – Fluxos dos reagentes requeridos na alimentação do reator, para produção de H_2 para diferentes potências de saída.	72
Figura 18 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 500°C.	73
Figura 19 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 600°C.	74
Figura 20 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 700°C.	75
Figura 21 – Disposição das espumas para os testes de branco.	78
Figura 22 – Fração molar dos produtos para os testes de branco de reforma auto térmica de etanol na bancada experimental desenvolvida.	79
Figura 23 – Fração molar dos produtos para os testes catalíticos de reforma auto térmica de etanol na bancada experimental desenvolvida.	80

Figura 24 – Disposição das espumas para os testes com catalisador.	81
Figura 25 – Sistema de aquecimento do ar e resistências do tipo cruzeta (à esquerda) e sistema de evaporação e reator (à direita) na fase de pré-montagem.	95
Figura 26 – Forno de aquecimento do reator.	95
Figura 27 – Sistema de injeção / Vela de pré aquecimento dos reagentes líquidos.	96
Figura 28 – Tanque de armazenamento e pressurização dos reagentes líquidos.	96
Figura 29 – Saída dos gases do reator (à esquerda), sistema trocador de calor para resfriamento dos gases (ao centro) e controladores de vazão (à direita).	97
Figura 30 – Interface de operação, com controladores de temperatura, botão liga/desliga, controlador PWM e sinais luminosos de operação.	97
Figura 31 – Equipamento para aquisição de temperaturass AGILENT (à esquerda) e controlador do sistema de aquecimento do reator (à direita).	98
Figura 32 – Disjuntores de alimentação (à esquerda) e contatores de acionamento (à direita).	98
Figura 33 – Cromatógrafo gasoso utilizado para para identificação dos gases reformados.	99
Figura 34 – Vista completa da bancada.	99
Figura 35 – Gráfico representando a vazão mássica da mistura água/etanol em função do tempo de abertura do ciclo.	100
Figura 36 – Renderização do projeto em corte de seção.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos combustíveis. (*Razão de equivalência em 1,0).	32
Tabela 2 – Descrição dos equipamentos mecânicos utilizados na construção da bancada.	37
Tabela 3 – Descrição dos equipamentos elétricos e de controle utilizados na construção da bancada.	38
Tabela 4 – Dados de projeto da construção do sistema reformador e espessuras requeridas.	41
Tabela 5 – Incertezas de medição dos aparelhos utilizados, associado ao respectivo parâmetro.	57
Tabela 6 – Incertezas combinadas e erros associados.	58
Tabela 7 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento interno da seção de aquecimento do ar.	60
Tabela 8 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção de aquecimento do ar.	61
Tabela 9 – Perdas de energia térmica do sistema aquecedor de ar.	61
Tabela 10 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento interno da seção evaporativa.	62
Tabela 11 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção evaporativa.	63
Tabela 12 – Perdas de energia térmica da seção evaporativa.	64
Tabela 13 – Características do sistema de aquecimento da seção do reator.	66
Tabela 14 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção do reator.	67
Tabela 15 – Perdas de energia térmica da seção do reator.	67
Tabela 16 – Vazões necessárias de oxigênio (O_2), etanol (C_2H_5OH), e água (H_2O) para produção necessária de H_2 para alimentação de diferentes potências nominais estimadas, sob diferentes temperaturas de reforma, em razões S/E = 1,5 e O/E = 0,5.	71
Tabela 17 – Dados dos testes de evaporação.	76
Tabela 18 – Vazões estabelecidas de oxigênio (O_2), etanol (C_2H_5OH), e água (H_2O) para os testes de reforma, bem como potência nominal estimada.	77
Tabela 19 – Eficiência térmica do sistema no presente trabalho em diferentes temperaturas comparada com a literatura.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	Reforma Auto Térmica
EGR	Recirculação dos Gases de Exaustão
LHV	Poder Calorífico Inferior
O/E	Oxigênio/Etanol
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
POX	Oxidação Parcial
PPI	Poros por Polegada
S/E	Vapor/Etanol
SOFC	Célula de Combustível de Óxido Sólido
SR	Reforma a Vapor
WGS	<i>Water Gas Shift</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔH_r	Entalpia da reação [kJ/mol]
e_c	Espessura Requerida para Tensão Circunferencial [mm]
R	Raio Interno do Vaso [mm]
S_{INOX}	Tensão Admissível do aço Inoxidável 310 [MPa]
E	Coefficiente de Eficiência de Solda[-]
e_l	Espessura Requerida para Tensão Longitudinal [mm]
e_t	Espessura Requerida para Tampos Planos [mm]
C	Fator de Fixação do Tampo [-]
q_{H_2O}	Potência Requerida para Vaporização da Água [kW]
\dot{m}_{H_2O}	Vazão Mássica de Água [kg/s]
$c_{p_{H_2O}}$	Calor Específico da Água [kJ/kg.K]
ΔT	Variação de Temperatura [K]
$h_{fg_{H_2O}}$	Entalpia de Vaporização da Água [kJ/kg]
$q_{C_2H_5OH}$	Potência Requerida para Vaporização do Etanol [kW]
$\dot{m}_{C_2H_5OH}$	Vazão Mássica de Etanol [kg/s]
$c_{p_{C_2H_5OH}}$	Calor Específico do Etanol [kJ/kg.K]
$h_{fg_{C_2H_5OH}}$	Entalpia de Vaporização do Etanol [kJ/kg]
$R_{conv,1}$	Resistência Térmica de Convecção Interna [°C/W]
h_1	Coefficiente Convectivo Interno [W/m².K]
A_1	Área de Superfície Interna [m²]
R_{tubo}	Resistência Térmica de Condução na Parede do Tubo [°C/W]
r_2	Raio Interno do Tubo [m]
r_1	Raio Externo do Tubo [m]
π	Número pi
k_1	Condutividade Térmica do Inox 310 [W/m.K]
L_{tubo}	Comprimento do Tubo Aquecedor de AR [m]
R_{isol}	Resistência Térmica de Condução do Isolante Térmico [°C/W]
r_3	Raio Externo do Isolante [m]
k_2	Condutividade Térmica do Isolante de Fibra de Cerâmica [W/m.K]
L_{isol}	Comprimento do Isolante Térmico no Aquecedor de AR [m]
$R_{conv,2}$	Resistência Térmica de Convecção Externa [°C/W]
h_2	Coefficiente Convectivo Externo [W/m².K]
A_3	Área de Superfície Externa [m²]
R_{total}	Resistência térmica Total do Sistema [°C/W]
\dot{Q}_{perda}	Perda de Calor para o Ambiente [W]
$T_{\infty,1}$	Temperatura do Ar Aquecido [°C]
$T_{\infty,2}$	Temperatura do Ar Ambiente [°C]

$\dot{Q}_{perda,rad}$	Perda de calor por radiação [W]
ϵ	Emissividade do material [-]
$A_{sup,2}$	Área Superficial Radiação [m ²]
σ	Constante de Boltzmann [W/m ² .K ⁴]
$T_{s,rad}$	Temperatura de Superfície Radiação [°C]
$T_{\infty,3}$	Temperatura do Ar Ambiente Radiação [°C]
Re_D	Número de Reynolds Escoamento Interno [-]
ρ_{ar}	Densidade do Ar [kg/m ³]
u_m	Velocidade Média do Escoamento [m/s]
D_{int}	Diâmetro Interno do tubo [m]
μ	Viscosidade Dinâmica [kg/m.s]
$L_{h,laminar}$	Comprimento de Entrada Hidrodinâmico em Escoamento Laminar [m]
$L_{t,laminar}$	Comprimento de Entrada Térmico em Escoamento Laminar [m]
Pr	Número de Prandtl [-]
μ_s	Viscosidade Dinâmica do Ar na Temperatura de Superfície do Tubo [kg/m.s]
Nu	Número de Nusselt [-]
μ_b	Viscosidade Dinâmica do Ar na Temperatura Média [kg/m.s]
h_{int}	Coeficiente de convecção Interna do Ar [W/m ² .K]
k_{ar}	Condutividade Térmica do Ar W/m.K
Ra_L	Número de Rayleigh para Comprimento Característico da Geometria [-]
g	Aceleração gravitacional [m/s ²]
β	Coeficiente de Expansão Volumétrica (1/Temperatura para gás ideal) [K ⁻¹]
T_s	Temperatura de Superfície [°C]
L_c	Comprimento Característico da Geometria [m]
ν	Viscosidade Cinemática do Fluido [m ² /s]
h_{ext}	Coeficiente de convecção Externa do Ar [W/m ² .K]
D_{ext}	Diâmetro Externo da Superfície [m]
h_{espuma}	Coeficiente Convectivo do Ar na Espuma [W/m ² .K]
Re_s	Número de Reynolds Área Específica da Superfície Espuma [-]
\dot{m}_{mix}	Vazão Mássica da Mistura Vapor/Etanol/Ar [kg/s]
μ_{mix}	Viscosidade Dinâmica da Mistura Vapor/Etanol/Ar [kg/m.s]
S_v	Área de Superfície Externa por Volume de Sólido [m ⁻¹]
A_{tr}	Área Transversal Interna do Reator [m ²]
ϵ	Porosidade da Espuma [-]
d_p	Diâmetro do Poro da Espuma [m]
$A_{sup,esp}$	Área superficial das Espumas Cerâmicas [m ²]
$V_{espumas}$	Volume Total das Espumas [m ³]
\dot{Q}_{reator}	Potência Requerida para Aquecimento do Reator [W]
T_{∞}	Temperatura de Corrente do Fluido [°C]

I_c	Corrente elétrica [A]
P_T	Potência de Saída da Célula a Combustível [Watt]
V_c	Tensão do circuito elétrico [V]
\dot{m}_{H_2}	Vazão Mássica de Hidrogênio [kg/s]
M_{H_2}	Massa Molecular do Hidrogênio [kg/mol]
n_e	Número de Elétrons Envolvidos na Reação [-]
F	Constante de Faraday [C/mol]
V_c	Tensão da Célula [Volt]
E_{rev}	Tensão Reversível da Célula de Combustível [Volt]
η_{fc}	Eficiência da Célula a Combustível [%]
\dot{n}_{H_2}	Fluxo Molar de Hidrogênio [mol/s]
$\dot{n}_{C_2H_5OH}$	Fluxo Molar de Etanol [mol/s]
$H_{2produzido}$	Hidrogênio Produzido via Reforma [$mol_{H_2}/mol_{C_2H_5OH}$]
$M_{C_2H_5OH}$	Massa Molecular do Etanol [kg/mol]
$R_{massa_{S/E}}$	Razão Mássica Água/Etanol [kg/kg]
n_{H_2O}	Mol de Água [mol]
$n_{C_2H_5OH}$	Mol de Etanol [mol]
M_{H_2O}	Massa Molecular da Água [kg/mol]
$R_{massa_{O/E}}$	Razão Mássica Oxigênio/Etanol [kg/kg]
n_{O_2}	Mol de Oxigênio [mol]
M_{O_2}	Massa Molecular do Oxigênio [kg/mol]
\dot{m}_{O_2}	Vazão Mássica de Oxigênio [kg/s]
\dot{V}_{H_2O}	Vazão Volumétrica de Água [m^3/s]
ρ_{H_2O}	Densidade da Água [kg/m^3]
\dot{V}_{O_2}	Vazão Volumétrica de Oxigênio [m^3/s]
ρ_{O_2}	Densidade do Oxigênio [kg/m^3]
$\dot{V}_{C_2H_5OH}$	Vazão Volumétrica de Etanol [m^3/s]
$\rho_{C_2H_5OH}$	Densidade do Etanol [kg/m^3]
$U_{C(y)}$	Incerteza Combinada de um Parâmetro y [-]
∂f	Derivada Parcial do Parâmetro Calculado [-]
∂x_j	Derivada Parcial da Grandeza Associada a uma Incerteza [-]
$U_{(x_i)}$	Incerteza Associada ao Aparelho de Medição [-]
\dot{m}	Vazão Mássica do Escoamento [kg/s]
$\dot{Q}_{perda,comb}$	Perda de Calor Combinada de Convecção e Condução para o Ambiente [W]
$\eta_{térmica}$	Eficiência Térmica do Sistema de Reforma [%]
\dot{m}_{H_2}	Vazão Mássica de Hidrogênio na Saída do Reator [kg/s]
LHV_{H_2}	Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio [J/kg]
$\dot{m}_{C_2H_5OH}$	Vazão Mássica de Etanol na Entrada do Reator [kg/s]

$LHV_{C_2H_5OH}$ Poder Calorífico Inferior do Etanol [J/kg]
 Q_e Potência Fornecida ao Sistema [W]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo principal	23
1.1.2	Objetivos específicos	23
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL	25
2.1.1	Reações estequiométricas de reforma	25
2.1.2	Catalisadores	26
2.1.3	Reformadores	26
2.2	ANÁLISE TERMODINÂMICA DA REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL	30
2.3	BREVE REVISÃO DO USO DE H ₂ COMO COMBUSTÍVEL	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	APARATO EXPERIMENTAL	34
3.1.1	Projeto mecânico do reformador	36
3.1.1.1	Cálculo de resistência mecânica da estrutura	36
3.1.1.2	Cálculo de potência requerida para evaporação	41
3.1.1.3	Considerações térmicas e hidrodinâmicas das seções de aquecimento do ar e evaporação	42
3.1.1.4	Considerações térmicas, hidrodinâmicas e cálculo da potência requerida no aquecimento do reator	46
3.1.2	Projeto do sistema elétrico de controle	48
3.2	MONÓLITO CATALÍTICO	49
3.3	CÁLCULO DE VAZÕES DE REAGENTES E POTÊNCIA NOMINAL	51
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	53
3.4.1	Calibração do bico injetor	53
3.4.2	Roteiro de operação da bancada	54
3.5	PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	ANÁLISE TÉRMICA E HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO	59
4.1.1	Seção de aquecimento do ar	59
4.1.2	Seção de evaporação	62
4.1.3	Seção do reator	64
4.2	VAZÕES DE REAGENTES E POTÊNCIA NOMINAL	68
4.2.1	Análise do equilíbrio químico	68
4.2.2	Vazões de alimentação de reagentes	70

4.3	TESTES DE AQUECIMENTO	71
4.4	TESTES DE EVAPORAÇÃO	73
4.5	REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL	77
4.5.1	Testes de branco	77
4.5.2	Testes catalíticos	78
4.6	EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SISTEMA	81
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	84
5.1	CONCLUSÕES	84
5.1.1	Projeto do Sistema	84
5.1.2	Evaporação dos Reagentes Líquidos	84
5.1.3	Testes Catalíticos	85
5.1.4	Eficiência do Sistema	85
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A – IMAGENS DA BANCADA	95
	APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO BICO INJETOR	100
	APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS	101
	APÊNDICE D – PROJETO ELÉTRICO DO SISTEMA DE CONTROLE	107

1 INTRODUÇÃO

O gás hidrogênio (H_2) gerado a partir de biocombustíveis ou de fontes renováveis vem se consolidando no cenário energético mundial como uma fonte de energia limpa e de alta aplicabilidade em diversos setores. O H_2 tem sido extensivamente estudado para utilização em motores de ignição por centelha devido às suas propriedades, como por exemplo, a alta velocidade de chama, aproximadamente três vezes maior que o etanol e a gasolina, e alto poder calorífico, o que melhora a eficiência térmica e a estabilidade da combustão do motor sobretudo em condições de queima pobre (SUN, Z.-y. *et al.*, 2012). O poder calorífico do hidrogênio é aproximadamente quatro vezes maior que o etanol e três vezes maior que a gasolina, além disso, o coeficiente de difusão do hidrogênio é aproximadamente 4,5 vezes maior que o coeficiente de difusão do etanol e oito vezes maior comparado à gasolina. melhorando assim a homogeneidade da mistura de ar-combustível (VERHELST; WALLNER, 2009; GHAZAL, 2013; BAUER; FOREST, 2001; SUN, S. *et al.*, 2012; TIPPAWAN; ARPORNWICHANOP, 2014).

Vários estudos relataram que a adição de H_2 à gasolina, em um motor de ignição por centelha aumenta fortemente a temperatura dentro do cilindro, ocasionando aumentos acentuados de emissões de NO_x (YU; DU *et al.*, 2017). Por outro lado, as emissões de NO_x podem ser fortemente reduzidas utilizando a técnica de Recirculação dos Gases de Exaustão (EGR), onde parte dos gases de exaustão voltam para a câmara de combustão, alterando a concentração de oxigênio dentro da câmara de combustão, obtendo assim uma maior concentração de ar-fresco dentro do cilindro e reduzindo os níveis de emissões de NO_x (YU; DU *et al.*, 2017; GREENWOOD *et al.*, 2014). Desta forma, para motores onde se utiliza H_2 misturado a outro hidrocarboneto, como gasolina e etanol, para uma redução na temperatura dentro da câmara de combustão, e sem que o sistema diminua a eficiência, a técnica de EGR tem sido investigada, diminuindo as emissões de NO_x , uma vez que esta emissão é uma das características indesejadas em uma mistura de combustível contendo H_2 (ALRAZEN *et al.*, 2016).

O hidrogênio (H_2), além de ser amplamente estudado como combustível de mistura em hidrocarbonetos, também é considerado um combustível promissor para alimentação em células a combustível. Nestes dispositivos, hidrogênio e oxigênio reagem quimicamente produzindo energia elétrica, gerando como produtos de reação somente água e calor. As aplicações de células a combustível incluem não só trem de potência de veículos mas também geração estacionária em residências e localidades isoladas (NI; LEUNG; LEUNG, 2007).

O gás hidrogênio (H_2) pode ser produzido por processos termoquímicos ou eletroquímicos. A Reforma a Vapor (SR) de combustível, é uma técnica amplamente empregada tanto na indústria petroquímica, quanto na síntese de amônia. Em tal re-

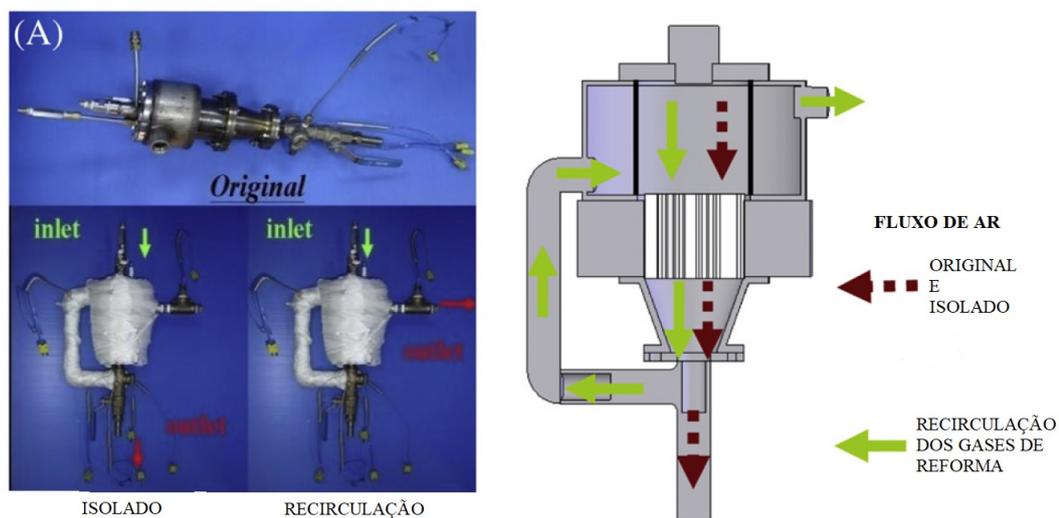
ação, um hidrocarboneto reage com vapor de água na presença de um catalisador a determinada temperatura, gerando diversos produtos de reação, entre eles o H_2 . Outros processos de reforma de combustíveis conhecidos são: a Reforma Auto Térmica (ATR) e a Oxidação Parcial (POX). A SR é uma reação endotérmica, ou seja, requer energia externa para ocorrer, por outro lado, é o processo em que se obtém altas taxas de produção de H_2 . A POX tem caráter exotérmico, porém suas taxas de produção de H_2 são menores devido a oxidação do H_2 em H_2O . O processo baseado na reação de ATR é uma combinação de ambos, de forma a reduzir a energia utilizada na reforma, e obter níveis satisfatórios de produção de H_2 (RABENSTEIN; HACKER, 2008; VASUDEVA *et al.*, 1996; SUN, S. *et al.*, 2012).

Os catalisadores são componentes essenciais em um sistema de reforma de combustível, e diversos metais (nobres e não-nobres) são utilizados como a fase ativa. Cada metal possui uma característica específica de conversão de combustível, para uma ATR de etanol os catalisadores largamente estudados e que possuem maior eficiência na produção de H_2 , em ordem decrescente de seletividade de H_2 são: ródio (Rh) > rutênio (Ru) > paládio (Pd) > platina (Pt) > níquel (Ni) > cobalto (Co) > ferro (Fe) (CAVALLARO *et al.*, 2003; CHIU; HORNG; CHOU, 2013). Palm (2018) testou a atividade catalítica de espumas cerâmicas de alumina (Al_2O_3), com 26 poros/cm, 12,7 mm de espessura e 15 mm de diâmetro. Foram realizados testes nas reações de reforma a vapor e oxidação parcial. As reações foram diluídas com 98% de N_2 , com o objetivo de reduzir os gradientes de temperatura, a vazão total de reagentes e diluição foi de 5L/min. A maior seletividade de H_2 foi observada na reação de reforma a vapor (SR).

Embora o trabalho de Palm (2018) tenha sido desenvolvido sobre espumas cerâmicas, a configuração e estudos experimentais de reatores para a reforma de etanol ainda é pouco discutida pela literatura. Um dos problemas a serem resolvidos é a evaporação e a mistura eficiente dos reagentes líquidos, pois a presença de hidrocarbonetos puros em contato com o catalisador tende a formar coque, comprometendo a atividade do catalisador. A Figura 1 mostra uma configuração de reator testada por Chiu, Horng e Chou (2013). O reator foi testado para a reação de oxidação parcial (POX) de etanol, com catalisadores a base de Rh, Ru, Fe, Co, Ni, Pt e Pd, com diâmetro de 60 mm e 20 mm de comprimento e suportados em óxido de alumina (Al_2O_3). O sistema foi testado em três configurações, sendo uma configuração onde o fluido passa pelo reator sem isolamento, uma segunda configuração onde o fluido percorre o reator isolado, e uma terceira configuração onde o fluido escoava pelo reator e parte dos gases de reforma retornam, passando pelo espaço anular que existe entre a parede externa e o cilindro que envolve o catalisador, mantendo o catalisador aquecido. Os resultados desse experimento mostram que a configuração que utiliza a recirculação de gases possuem uma produção de H_2 superior, quando comparada às configurações

isolada e sem isolamento e o próprio calor de recirculação promove a vaporização dos reagentes líquidos. A seletividade de H_2 se mostrou superior quando utilizados catalisadores a base de Ródio (Rh).

Figura 1 – Configuração de um reator para reforma de etanol.



Fonte: Adaptado de (CHIU; HORNG; CHOU, 2013).

Reatores para reforma auto térmica de combustíveis líquidos, como querosene e diesel, vem sendo desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisa de Jülich (PASEL; SAMSUN; MEISSNER *et al.*, 2020; PASEL; SAMSUN; TSCHAUDER *et al.*, 2017, 2015; PASEL; MEISSNER *et al.*, 2007; PASEL; LATZ *et al.*, 2008). O modelo denominado ATR 5 foi desenvolvido para a reforma auto térmica de querosene de aviação (JET A-1). Neste projeto ar e água utilizados na reforma são pré aquecidos à 200 °C por meio do calor proveniente da reforma, e após isso são superaquecidos por uma fonte de calor externa (elétrica) até 480 °C. A mistura ar e água adentram o reator em contra corrente com o combustível que é atomizado por meio de um bico injetor. As principais limitações deste modelo de reator foram a incompleta evaporação de combustível, e pequenas ignições do combustível devido ao contato com o oxigênio na região de evaporação, levando a desativação do catalisador, devido à formação de coque, comprometendo assim sua atividade catalítica (PASEL; LATZ *et al.*, 2008).

Um novo modelo, para reforma auto térmica, denominado ATR 7, Pasel, Meißner *et al.* (2007) melhoraram o processo de evaporação do combustível, comparado ao ATR 5. Este modelo traz um pequeno anteparo na região de evaporação, permitindo que o escoamento de combustível atomizado sofra turbulência, melhorando assim a evaporação. A injeção do ar para reforma, neste modelo, ocorre por meio de pequenos orifícios, localizados muito próximos ao catalisador, evitando que ocorram ignições do

combustível. O modelo se mostrou mais eficiente comparado ao ATR 5, mostrando uma melhora na evaporação do combustível, como consequência, um aumento da vida útil do catalisador.

Pasel, Samsun, Tschauer *et al.* (2017), com o objetivo de uma melhor evaporação dos fluidos reagentes, bem como visando uma inicialização rápida do sistema, desenvolveram o ATR 12. Este modelo prevê uma modificação do superaquecedor de vapor, modificando de tubos espiralados como era no ATR 7 para espécies de anteparos tipo conchas com fios resistivos para aquecimento. Nesta configuração, os anteparos circundam a região de reforma (catalisador), e água líquida é atomizada neste anteparo, obtendo assim uma pequena queda de pressão quando comparada ao sistema de serpentina utilizada no projeto do ATR 7. O principal êxito neste projeto do ATR 12 foi a inicialização mais rápida, obtendo um intervalo de aproximadamente 15 minutos.

O mais recente dos projetos de reatores para reforma auto térmica de combustíveis líquidos, desenvolvidos em Jülich, é denominado o ATR 14. Esta é a versão considerada a fase final do processo de pesquisa e produção de reatores para reforma auto térmica, produzidos pelo instituto. Nesta versão de reator, Pasel, Samsun, Meißner *et al.* (2020) mantiveram a configuração do projeto anterior (ATR 12), porém com duas características adicionais, uma delas um anteparo em formato de gota na região após a região de evaporação, protegendo o catalisador, onde gotículas não evaporadas de combustível entram em contato com esse anteparo e evaporam por completo. Outra característica é que este reator foi produzido comercialmente pelo processo de conformação de chapas metálicas, onde versões anteriores utilizam meio de produção de peças únicas e especiais. Essa mudança de tecnologia permite a massificação de produção do ATR 14 mais eficiente em termos de custo e tempo de produção.

Neste contexto, o desenvolvimento de uma bancada experimental para testes de reformadores é fundamental para permitir a avaliação de uma série de desafios identificados na ampliação do sistema, tais como a estratégia de evaporação de reagentes líquidos, a elaboração de procedimentos de inicialização do sistema, o uso de misturas não diluídas e a estratégia de aquecimento e fornecimento de energia para a reação auto térmica. O presente trabalho se insere no âmbito do projeto de pesquisa intitulado “Unidade autônoma eficiente de geração de gases para células a combustíveis de óxido sólido (Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)) baseado em reformador de etanol”, cujo objetivo é o desenvolvimento de um protótipo de uma unidade de geração de gases automatizada e eficiente, baseada em reformador de etanol, com vistas a sua aplicação na alimentação de uma SOFC de 5 kW para eletrificação da propulsão veicular.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos esperados na realização deste trabalho estão elencados a seguir.

1.1.1 Objetivo principal

O principal objetivo deste trabalho é o projeto e o desenvolvimento de um reator para reforma de etanol e geração de gases ricos em H_2 , assim como um aparato experimental para sua validação com sistemas de controle de temperatura e vazões.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Projetar e construir um reformador de etanol de pequeno porte que permita a alimentação de reagentes (etanol, água e ar) diluídos e não diluídos em N_2 ;
- Projetar e construir um sistema de controle da alimentação dos reagentes e de controle de temperaturas da bancada experimental;
- Investigar a estratégia de vaporização dos reagentes no reator, avaliando a estabilidade do sistema e obtendo as condições de operação em regime permanente;
- Investigar os mecanismos de transferência de calor no reformador;
- Avaliar o tempo de aquecimento do reformador até condições de inicialização da operação de reforma;
- Medir a composição dos gases de reforma e avaliar a potência nominal do sistema em diferentes temperaturas de operação;
- Avaliar a eficiência energética do sistema reformador.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 trouxe uma breve introdução sobre o tema estudado, os principais estudos realizados sobre o assunto e os objetivos principais e específicos do trabalho desenvolvido.

O capítulo 2 traz os fundamentos bibliográficos utilizados e relativos à produção de hidrogênio como combustível, reforma de combustíveis, bem como uma breve revisão bibliográfica sobre reatores em escala laboratorial para reforma auto térmica. Uma ênfase será dada à ATR do etanol, devido à relevância ao tema proposto.

O capítulo 3 traz a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Uma descrição esquemática da bancada é apresentada, bem como os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do projeto experimento.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos. Apresenta uma análise de equilíbrio químico da reforma auto térmica do etanol. Bem como o cálculo das vazões de etanol, água e oxigênio necessárias para alimentação do reator. Considerações térmicas e fluidodinâmicas sobre os escoamentos envolvidos no funcionamento da bancada. Testes de evaporação, aquecimento e testes catalíticos do sistema reformador.

Por fim, no capítulo 5 as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

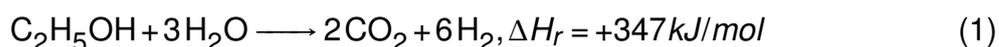
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda uma revisão da literatura sobre os principais aspectos tecnológicos da reação de reforma auto térmica de etanol, incluindo os principais catalisadores utilizados, reformadores em escala laboratorial e análise termodinâmica do sistema. Por fim, uma breve revisão de trabalhos relacionados à utilização do H₂ como combustível automotivo é apresentada.

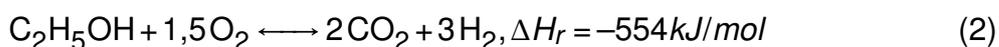
2.1 REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL

2.1.1 Reações estequiométricas de reforma

A reforma do etanol pode ser realizada por meio de três reações diferentes: Reforma a Vapor (SR), Oxidação Parcial (POX) e Reforma Auto térmica (ATR), explicadas a seguir. A reforma a vapor (SR) é um processo no qual o combustível reage com vapor d'água na presença de um catalisador heterogêneo. A reforma a vapor de metano (CH₄) é largamente utilizada nas indústrias petroquímica e de síntese de amônia, devido à sua alta produção de H₂ em altas temperaturas. No caso da reforma de etanol (Equação (1)), o reator funciona com uma alimentação de etanol e vapor d'água vaporizados que passam por um catalisador em altas temperaturas, onde ocorre a reação química, convertendo assim o etanol e vapor em vários gases, sendo o principal e de maior quantidade, o H₂. A SR, por se tratar de um processo endotérmico, necessita de energia externa para ocorrer (WANG; LÜ, 2021).



A reação de oxidação parcial (POX) é um processo no qual o combustível a ser reformado reage com oxigênio, na presença de um catalisador a altas temperaturas, produzindo o hidrogênio e outros subprodutos. A combustão completa não ocorre pois a composição dos reagentes é rica em combustível. A oxidação parcial do etanol (Equação (2)) é um processo exotérmico, ou seja, não é necessário uma fonte de calor externa para que a reação ocorra. As características desse processo são uma rápida inicialização, porém uma baixa produção de H₂ quando comparada à reforma a vapor (TIPPAWAN; ARPORNWICHANOP, 2014).



A reação de reforma auto térmica (ATR) é um processo que combina a SR quanto a POX em um processo termicamente neutro, pois a energia necessária para que a reforma a vapor ocorra é fornecida pela reação de oxidação parcial. Para que esse processo ocorra, são necessários 1,78 mol de vapor d'água e 0,61 mol de oxigênio por mol de etanol, representado pela Equação (3) (GRASCHINSKY *et al.*, 2012).



2.1.2 Catalisadores

A escolha do catalisador em uma reforma auto térmica de etanol é fundamental, pois desempenham um papel importante no que diz respeito a conversão, seletividade para hidrogênio e formação de carbono sólido (Baruah *et al.* (2015)). Cada catalisador possui um atividade catalítica distinta, promovem caminhos de reações diferentes e possuem diferentes custos para sua caracterização, podendo ter seu revestimento de metais nobres ou metais não-nobres.

Em um estudo experimental, Hung *et al.* (2012) investigaram a reforma auto térmica do etanol sob diversos metais catalisadores (cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), rutênio (Ru), ródio (Rh), paládio (Pd), prata (Ag), irídio (Ir), platina (Pt) e ouro (Au)), suportados sobre óxido de alumina (Al_2O_3), faixas de temperatura de reforma entre 400 °C e 600 °C, razão S/E = 3 e O/E = 0,3. Os resultados obtidos indicaram que em uma temperatura de reforma de 600 °C, o catalisador de ródio (Rh), apresentou melhor desempenho, obtendo conversão de etanol na faixa de 97% e produção de H_2 em 94%. Neste trabalho, a caracterização do catalisador em Rh apresentou as seguintes características: área superficial de 79,9 m^2/g ; teor metálico (wt%) de 1,6; e tamanho de cristalito de 15,00 nm.

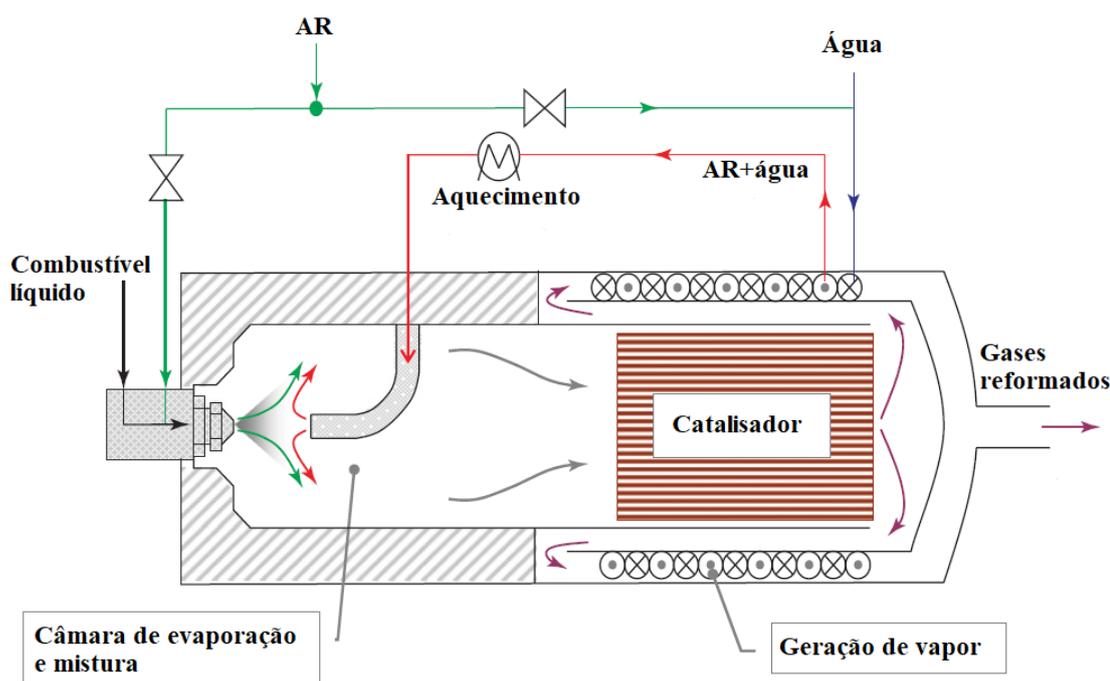
Em outro experimento semelhante, realizado por Chiu, Horng e Chou (2013), foram avaliados sete catalisadores (ferro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), platina (Pt), paládio (Pd), ródio (Rh) e rutênio (Ru)), sobre óxido de alumina (Al_2O_3) na reforma auto térmica do etanol, com especificações de teor metálico de 6 wt%; densidade de 1,77 kg/m^3 ; e monólitos de diâmetro = 60 mm por um comprimento de 50 mm. Os melhores desempenhos entre os catalisadores avaliados, em ordem decrescente de produção de H_2 , foram Rh>Ru>Pd>Pt>Ni>Co>Fe, confirmando assim a grande eficiência dos catalisadores a base de ródio (Rh). No mesmo estudo, foi usado a configuração de recirculação de calor com o ar aquecido, e juntamente com o catalisador de Rh, foi a maior produção de H_2 , quando comparado ao sistema sem a recirculação de calor.

2.1.3 Reformadores

Pasel, Meißner *et al.* (2007) desenvolveram um projeto de reformador auto térmico para reforma de combustível JET A-1 (querosene de aviação), o modelo denominado ATR 5 é ilustrado na Figura 2. Na configuração, água e ar são injetados em uma região anular externa à região de reforma, onde a mistura é superaquecida até 200 °C utilizando parte do calor da reação. O escoamento sofre um aquecimento adicional elevando sua temperatura à aproximadamente 480 °C, para então adentrar ao reator,

em contra corrente à mistura fluido combustível + ar, que por sua vez encontra-se a temperatura ambiente, representada pela linha verde. O escoamento de combustível + ar entra no reator por um bico injetor, até a câmara de evaporação e mistura, que antecede o catalisador. A configuração do ATR 5 não se mostrou eficiente para a completa evaporação do combustível, levando a uma desativação do catalisador depois de aproximadamente 90 horas de trabalho.

Figura 2 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 5.

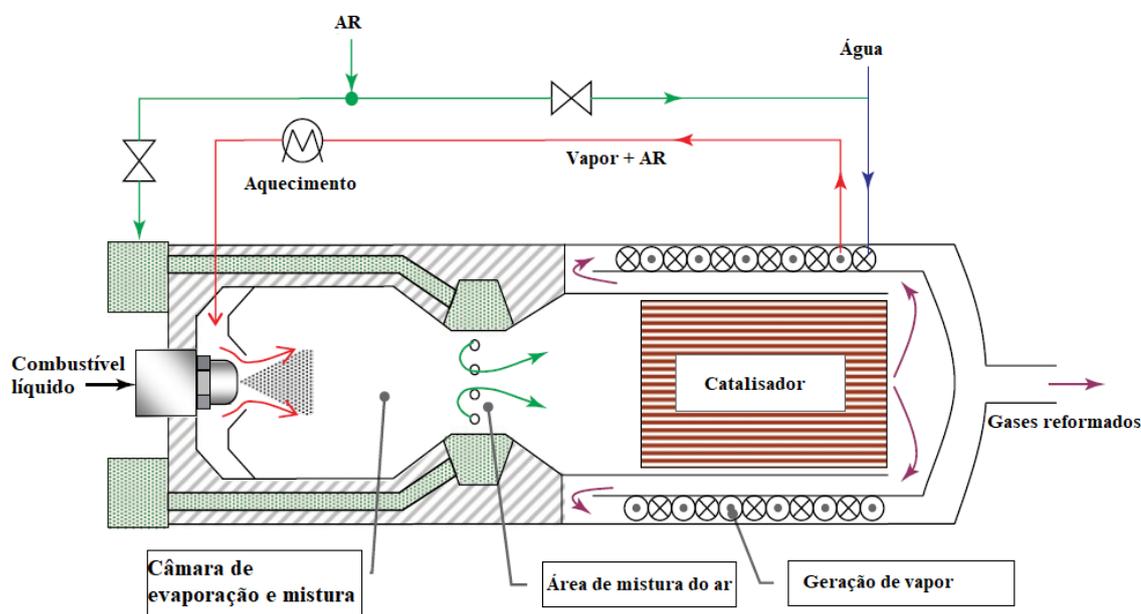


Fonte: Adaptado de (PASEL; MEISSNER *et al.*, 2007)

Para melhorar o processo de evaporação e mistura do combustível dentro da câmara, Pasel, Latz *et al.* (2008) melhoraram o projeto do ATR 5 e desenvolveram o projeto do reator auto térmico denominado ATR 7, ilustrado pela Figura 3. As principais mudanças no novo modelo de reator foram uma nova região na injeção do combustível, com anteparos para uma geração de turbulência. O modelo também prevê a evaporação do combustível com vapor superaquecido na câmara de evaporação, evitando possível ignição do combustível devido à falta de oxidante e/ou pequena quantidade de oxidante, uma vez que o vapor tem uma pequena quantidade de ar. A área de mistura com o ar, se dá em uma região com o combustível já vaporizado, sendo esta região com seção transversal de passagem menor, para uma melhor homogeneização da mistura. O novo projeto se mostrou bastante eficiente, com boa estabilidade, promovendo uma reforma com composições dos produtos constantes, com uma excelente conversão dos hidrocarbonetos, sem qualquer sinal de desativação do catalisador durante

aproximadamente 500 horas de operação.

Figura 3 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 7.

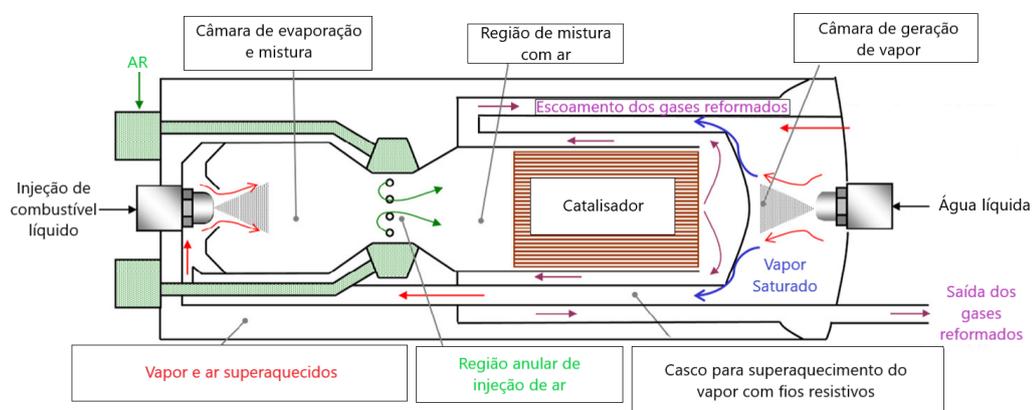


Fonte: Adaptado de (PASEL; LATZ *et al.*, 2008)

Para uma melhor homogeneização e evaporação dos fluidos reagentes, Pasel, Samsun, Tschauer *et al.* (2017) desenvolveram uma versão atualizada da série de reatores para reforma auto térmica de combustíveis líquidos. Visando uma inicialização rápida do sistema, desenvolveram o denominado ATR 12 com uma modificação do superaquecedor de vapor, como podemos observar na Figura 4. A modificação substituiu os tubos espiralados do ATR 7 por um anteparo concêntrico à região de reforma, neste caso água líquida é atomizada neste anteparo pela região posterior do reator. Este anteparo possui fios resistivos elétricos para auxiliar no superaquecimento do vapor, e como a área de seção transversal para passagem do vapor aumentou, houve uma redução nas perdas de pressão quando comparado ao ATR 7. Uma das grandes preocupações para a utilização a bordo destes sistemas é o tempo para inicialização do mesmo. O ATR 12 demonstrou que aderindo o fio resistivo de aquecimento à forma construtiva do superaquecedor o tempo de aquecimento do reator está em torno de 15 minutos. Para sistemas onde o reator for utilizado como unidade auxiliar de energia, todo o sistema, tem um tempo de inicialização de 30 minutos, sendo um valor aceitável de acordo com o Departamento de Energia (DOE).

Considerado a fase final da série de projeto dos reatores para reforma auto térmica, desenvolvidos nos últimos 15 anos por Jülich, e baseado nas várias gerações do reator, Pasel, Samsun, Meißner *et al.* (2020) desenvolveram o ATR 14 ilustrado na Figura 5. Neste novo projeto, a configuração é baseada no modelo anterior de reator

Figura 4 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 12.



Fonte: Adaptado de (PASEL; SAMSUN; TSCHAUDER *et al.*, 2017).

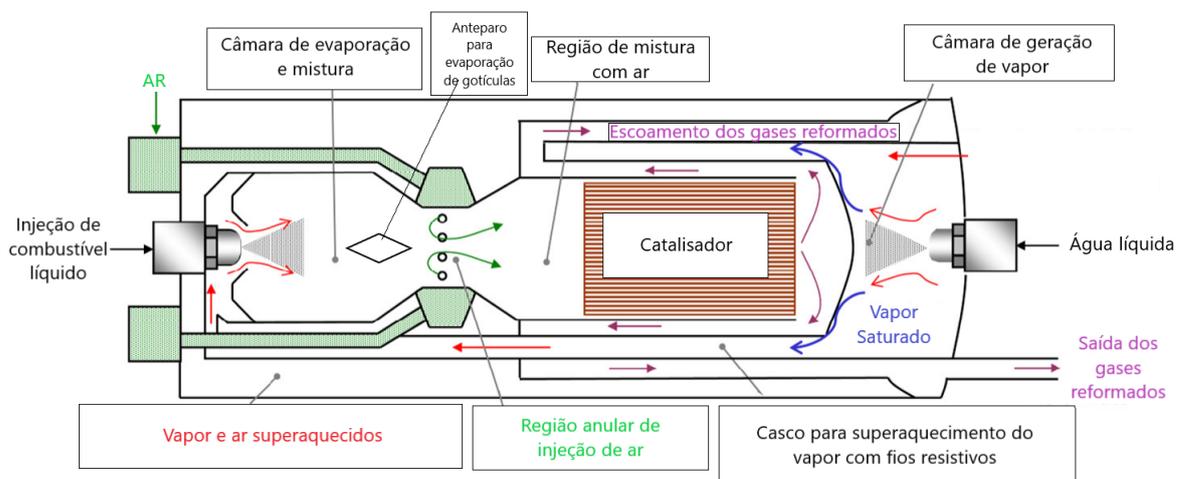
desenvolvido (ATR 12), com duas principais características adicionais. Para evitar que pequenas gotículas de fluido combustível não evaporadas entrem em contato com o catalisador, levando à sua desativação por coque, um anteparo com formato de gota foi instalado na região de evaporação. Desta forma, pequenas gotículas não evaporadas ao entrarem em contato neste anteparo em alta temperatura serão evaporadas por completo. Outra característica foi o processo de fabricação do reator, que ocorreu por conformação das chapas metálicas, ao contrário dos modelos anteriores que foram construídos como peças únicas e especiais, dificultando a reprodução em larga escala. Com esta alteração na tecnologia de fabricação, a massificação da produção para fins comerciais do reator ATR 14 foi facilitada, tornando-o mais eficiente em termos de custos e tempo para a produção.

Diante das referências exploradas, pode-se constatar algumas dificuldades na reforma auto térmica de combustíveis líquidos, uma dessas dificuldades se trata da completa evaporação dos reagentes líquidos, pois o contato de gotículas com a superfície do catalisador pode levar à sua desativação pela formação de coque.

Outro desafio a ser superado é o tempo de inicialização do sistema de reforma, considerando sua utilização em sistemas embarcados. O tempo de inicialização do sistema dependerá de vários fatores, tais como, quantidade de catalisadores cerâmicos, material utilizado para as trocas térmicas e o fluxo de reagentes necessário para evaporação.

A engenharia do produto também é fundamental para que a seleção dos materiais sejam resistentes às altas temperaturas de reação, em torno de 700°C. E acima de tudo a construção deve levar em conta a facilidade na construção, por meio de processos de fabricação simplificados, tornando as peças executáveis e com baixo custo de fabricação, contribuindo para a posterior comercialização deste sistema de

Figura 5 – Representação esquemática do projeto do reformador auto térmico ATR 14.



Fonte: Adaptado de (PASEL; SAMSUN; MEISSNER *et al.*, 2020).

reforma.

2.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA DA REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL

A reforma do etanol vem sendo estudada por muitos pesquisadores (SUN, S. *et al.*, 2012; VASUDEVA *et al.*, 1996; RABENSTEIN; HACKER, 2008; TIPPAWAN; ARPORNWICHANOP, 2014; WANG; WANG *et al.*, 2002; HARYANTO *et al.*, 2005b; GRASCHINSKY *et al.*, 2012; FIUZA *et al.*, 2012; BARUAH *et al.*, 2015; HUNG *et al.*, 2012; CHIU; HORNG; CHOU, 2013; CAVALLARO *et al.*, 2003; PALM *et al.*, 2020), devido à grande disponibilidade de etanol, principalmente no Brasil, se tornando assim uma alternativa limpa e sustentável para geração de hidrogênio e posterior geração de energia elétrica, decorrente de uma célula a combustível alimentada por H_2 . Para Tippawan e Arpornwichanop (2014) diversos fatores influenciam a eficiência na reforma do etanol, influenciando diretamente na eficiência da célula SOFC. Segundo o estudo termodinâmico em uma reforma auto térmica, a temperatura de reforma é um fator fundamental para a eficiência do sistema, bem como a razão vapor d'água/etanol (S/E) na alimentação do reator, pois em temperaturas baixas e razões S/E abaixo de 2, em uma razão oxigênio/etanol (O/E) de 0,61, há uma grande formação de carbono sólido, elemento que é prejudicial à SOFC. O ponto ótimo de operação na ATR estudada, considera altas produções de hidrogênio e a não formação de carbono sólido, citando uma temperatura ótima de operação acima de 900 K e razões S/E acima de 6, em uma razão O/E de 0,61.

Shaohui Sun *et al.* (2012), em um estudo similar, avaliaram termodinamicamente a reforma auto térmica do etanol para produção de hidrogênio, via minimização da ener-

gia livre de Gibbs, simulando as condições de equilíbrio em uma faixa de temperatura de 700 a 1200 K, razões O/E igual a 0,25; 0,50 e 0,75; e razões S/E de 1; 4; 7 e 10. Sob estas condições a máxima produção de hidrogênio obtida foi em temperaturas acima de 900 K, ou seja, em 1000 K, O/E = 0,25 e S/E = 7 a produção de hidrogênio foi de 4,71 moles de H₂ por mol de etanol, obtendo uma eficiência térmica de 85% na reforma auto térmica do etanol.

Em estudo semelhante, Rabenstein e Hacker (2008) avaliaram termodinamicamente a reforma auto térmica do etanol, usando o método de minimização da energia livre de Gibbs, desta forma avaliaram a composição dos produtos no equilíbrio, em uma faixa de temperatura de T = 200 a 1000 °C, razões O/E = 0,00 a 0,75 e razões S/E = 0,00 a 10,00; e concluíram que a melhor operação se dá em temperaturas acima de 600 °C, sendo assim, em uma temperatura de 727 °C, uma razão O/E = 0,25 e uma razão S/E = 7, a produção de hidrogênio foi de 4,8 moles de H₂ por mol de etanol.

Liu *et al.* (2008), em um estudo termodinâmico, avaliaram a reforma auto térmica de etanol, pelo método da minimização da energia livre de Gibbs. Utilizaram três temperaturas de interesse, sendo 700, 900, e 1100 K, razões S/E de 1 a 10, e razões O/E de 0 a 0.9, sob uma pressão constante de 1 bar. Para temperaturas abaixo de 700 K a reforma auto térmica do etanol não é interessante, pois há uma grande formação de metano, o qual diminui substancialmente em temperaturas entre 700 e 1100 K. O estudo ainda mostra que a condição ideal para produção de hidrogênio é na temperatura de 900 K, concluem ainda que, quanto maior as razões S/E e a temperatura de reforma, menor é a formação metano e deposição de carbono sólido (coque) no catalisador, no entanto a formação de monóxido de carbono apresenta uma tendência oposta.

2.3 BREVE REVISÃO DO USO DE H₂ COMO COMBUSTÍVEL

A Tabela 1 lista as propriedades físico-químicas do H₂ comparando-as com as de outros hidrocarbonetos. Como pode-se observar, o H₂ tem uma velocidade de chama e uma difusividade maior quando comparado ao etanol (C₂H₅OH), isoctano (C₈H₁₈), metano (CH₄), diesel (C₁₂H₂₆) e metanol (CH₃OH). Quando o H₂ é misturado à hidrocarbonetos em motores de ignição por centelha, suas propriedades ajudam a aumentar a eficiência do motor e reduzem as emissões (exceto emissões de NO_x). A adição de hidrogênio ajuda na estabilidade da combustão devido à alta velocidade da chama laminar e à alta difusividade, além de possuir Poder Calorífico Inferior (LHV) mais altos, pois o valor é três vezes maior que a gasolina e quatro vezes maior que o etanol (KARAGÖZ; BALCI; KÖTEN, 2019; YU; GUO *et al.*, 2019; AYAD *et al.*, 2020; AL-THEHABEY, 2021).

Kim *et al.* (2018) investigaram os efeitos do H₂ na estabilidade da combustão de um motor turbo a gasolina de injeção direta em várias proporções ar-combustível.

Tabela 1 – Propriedades dos combustíveis. (*Razão de equivalência em 1,0).

Propriedades	Hidrogênio	Etanol	Isoctano	Metano	Diesel	Metanol
Fórmula	H ₂	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₈	CH ₄	C ₁₂ H ₂₆	CH ₃ OH
Massa molecular [g/mol]	2,016	46,07	114,22	16,04	178,6	32,04
Densidade [kg/m ³]	0,08	785	740	0,65	815	792
Temperatura de chama [°C]	2210	1920	2030	2226	1720	1949
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	119,9	26,9	44,5	52,42	42,5	20,09
Densidade energética LHV [MJ/m ³]	11	15,84	34,32	34,07	35,8	17,3
Velocidade de chama [m/s] *	1,7	0,61	0,57	0,45	0,3	0,48
Temperatura de auto-ignição [°C]	572	558	440	450	355	465
Energia mínima de ignição [mJ]	0,02	0,7	2,4	0,28	-	0,14
Distância de extinção [mm]	0,64	0,9	2,84	2,5	2,1	1,8
Difusividade no ar [cm ² /s]	0,096	0,021	0,012	0,16	0,004	0,15

Fonte: Adaptado de (GLASSMAN; YETTER; GLUMAC, 2014; TURNS *et al.*, 1996; BOLES; CENGEL, 1989; HEYWOOD, s.d.; AGARWAL, 2007; PETKOV; VEZIROĞLU; SHEFFIELD, 1989; RAGLAND; BRYDEN, 2011)

Eles avaliaram que a adição de fração mássica de hidrogênio de 0 a 5% melhorou a estabilidade da combustão em condições de mistura de 1,0 a 1,5. O experimento mostra que a adição de hidrogênio levou a um aumento médio da eficiência térmica de 7,7% com mistura pobre em comparação com a combustão estequiométrica sem hidrogênio.

Zhang, Ji e Wang (2016) estudaram as emissões de CO de um motor de ignição por faísca operando com etanol puro e etanol enriquecido volumetricamente com 3% de H₂. Eles mostraram que as emissões de CO diminuem de aproximadamente 2500 ppm para 1500 ppm quando a relação ar-combustível é mantida em 1.0. Em condições de relação ar-combustível mais ricas, lambda acima de 1.0, as reduções de CO acontecem mas em proporções menores, em torno de 700 para 400 ppm. Isso

ocorre pelo fato da maior fração de oxigênio dentro da câmara, oxidando de forma mais efetiva todo o hidrocarboneto.

Akansu *et al.* (2017) estudaram o aumento da eficiência térmica em um motor de ignição por centelha, adicionando frações mássicas de H_2 à mistura G80E20 (80% de gasolina e 20% de etanol). Os valores de eficiência térmica obtidos no experimento foram de 25,6; 28,7; 29,5; 31,1 e 30,9% correspondendo a injeção de 0, 10,7; 21,3; 33,8 e 45,1% das frações mássicas de hidrogênio, respectivamente. Este aumento da eficiência pode ser explicado pelo fato da alta velocidade de chama do H_2 . A eficiência térmica foi aumentada de 25,6 a 30,9% com adição de H_2 até 45,1% para mistura gasolina-etanol (G80E20) no experimento.

Uma das limitações no uso do H_2 está na sua baixa densidade, dificultando o transporte e o armazenamento, exigindo altas pressões para transportá-lo de forma compacta. Outra limitação da adição de H_2 em motores de combustão interna é a alta temperatura de chama adiabática, que causa altos níveis de temperatura no interior do cilindro, auxiliando assim na emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) (ALRAZEN *et al.*, 2016; DU *et al.*, 2017; YILMAZ; TAŞTAN, 2018).

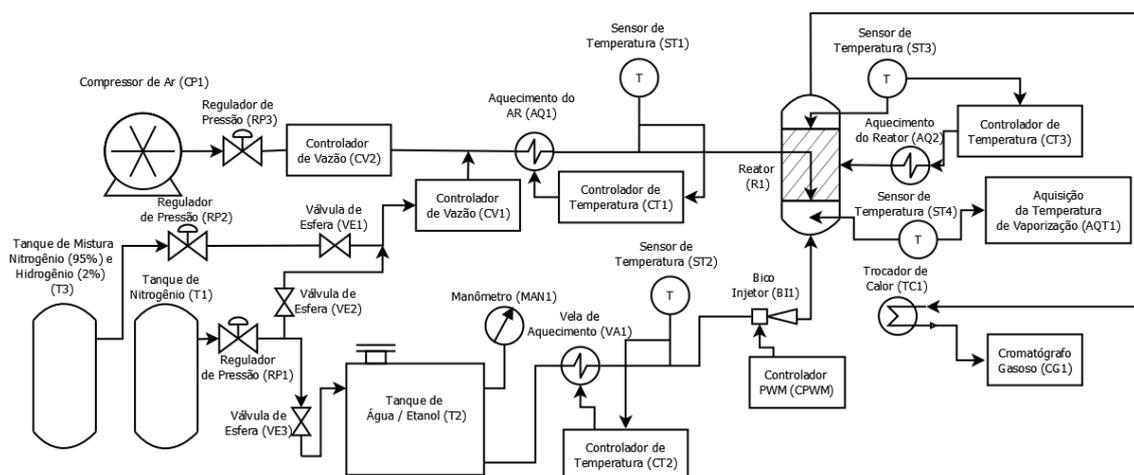
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, uma representação esquemática do aparato experimental, bem como seu funcionamento é apresentado, assim como os materiais utilizados para tal. Também é apresentada a metodologia utilizada para o cálculo de vazões de etanol, oxigênio e água para a reforma, bem como a metodologia de preparação e caracterização do catalisador. Um modelo de análise térmica é apresentado, a fim de estimar grandezas como, coeficientes convectivos do escoamento, potências necessárias para evaporação e aquecimento do sistema, e bem como as perdas de energia térmica para o ambiente. A apresentação do projeto mecânico e elétrico do sistema de reforma também é apresentada neste capítulo.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

A Figura 6 traz uma representação esquemática do experimento. O experimento é dividido em duas linhas de escoamento, sendo uma linha para os reagentes, etanol e água, e outra para os fluidos gasosos, como o ar para reforma, nitrogênio (N_2) para diluição e gás para a ativação do catalisador ($N_2 + H_2$). A descrição do funcionamento da bancada, bem como dos sistemas de controle automático de temperatura e vazão de reagentes líquidos são explicados. A Tabela 2 e a Tabela 3 trazem as características de cada componente utilizado na construção da bancada.

Figura 6 – Representação esquemática do experimento proposto.



Fonte: Autor.

O tanque de N_2 (T1) é utilizado para a pressurização da mistura água / etanol que se encontra no tanque (T2), e a regulagem da pressão do tanque (T2) é realizada pelo regulador de pressão (RP2) e transmitida pelo manômetro (MAN1). A mistura água/etanol escoar até o sistema de aquecimento (VA1), realizado por meio de uma

vela automotiva. O controle da temperatura do escoamento é realizado por meio da aquisição da temperatura real do escoamento pelo sensor de temperatura tipo K (ST2), que envia um sinal ao controlador de temperatura (CT2), que por sua vez manda sinais elétricos a um contator. O contator fornece ou interrompe o fornecimento do fluxo de tensão elétrica para a vela de aquecimento, a depender da temperatura ajustada no controlador. A tensão fornecida para a vela é proveniente de uma bateria elétrica automotiva de 12 Volts.

O escoamento segue pela tubulação até chegar no injetor (BI1). O injetor se trata de um bico injetor de combustível de motocicleta, com 6 orifícios de escoamento. O controle do bico injetor é realizado por meio de um sistema eletrônico de PWM - *Pulse Width Modulation* (CPWM). O sistema PWM opera com faixas de frequência e ciclos de abertura, ou seja, para cada ciclo de abertura que vai de 0 a 100% uma determinada vazão é descarregada pelo bico. A regulação da frequência e dos ciclos de abertura é realizada pela interface digital do sistema PWM. Os valores de vazão de escoamento fornecida pelo bico em função da frequência e ciclos de abertura foram obtidos por uma calibração pelo método gravimétrico, utilizando balança de precisão. Os procedimentos de calibração e curvas obtidas são explicados adiante. O bico injetor é conectado junto ao sistema reator (R1), sendo assim a descarga do escoamento é feita no interior do reator, na região de evaporação.

O compressor de ar (CP1) fornece o ar seco para a reforma. O regulador de pressão (RP3) ajusta a pressão do ar de entrada. O controlador de vazão (CV2) ajusta a vazão de ar conforme configurado em sua interface. O escoamento de ar adentra o sistema de aquecimento do ar (AQ1), e é aquecido por meio de resistências do tipo cruzeta, alojadas no interior do módulo de aquecimento de ar, fabricados de aço INOX 310. A resistência do tipo cruzeta é uma forma de resistência elétrica utilizada para o aquecimento de ar. Sua característica principal é um suporte de material não condutor, que lembra uma cruz, e envolto a esse suporte encontram-se os fios resistivos. Quando instaladas, a característica do escoamento é cruzado, uma vez que o ar escoar sobre as espiras de maneira perpendicular. A Figura 25 (apêndice) fornece uma melhor compreensão da forma construtiva da resistência tipo cruzeta.

O sistema de controle do escoamento de ar aquecido é realizado pelo sensor de temperatura tipo K (ST1) em conjunto com o controlador de temperatura (CT1). O controlador de temperatura envia o sinal de tensão elétrica para um contator de potência que aciona ou interrompe o fluxo de energia elétrica para as resistências. Desta forma o controle de temperatura é automático de acordo com a temperatura ajustada na interface digital do controlador.

O escoamento de ar aquecido segue para o reator (R1), onde entra em contato com o escoamento pré aquecido da mistura água/etanol em contra-corrente, descarregada pelo bico injetor (BI1). A região onde os escoamento de ar aquecido e da

mistura água etanol se homogenizam é denominada região de evaporação. Sendo a região onde ocorre a completa evaporação dos fluidos reagentes. A temperatura de evaporação é minuciosamente controlada, a fim de observar momentos da não evaporação de reagentes. A temperatura de evaporação é transmitida por meio do sensor de temperatura tipo K (ST4) ao sistema de aquisição de dados (AQT1).

A mistura de fluido (ar, vapor de água e etanol) escoam pelo interior do reator (R1), região onde ocorre a reforma dos reagentes em gases ricos em H_2 . O reator possui um sistema de aquecimento externo (AQ2), que fornece energia térmica para que o sistema opere de maneira isotérmica. O controle automático da temperatura do reator é realizado pelo sensor de temperatura tipo K (ST3) em conjunto com o controlador de temperatura (CT3). O controlador ajusta a temperatura no interior do reator de acordo com a temperatura de reforma requerida e programada em sua interface digital.

Após a reação auto térmica, o escoamento dos gases reformados segue para fora do reator por uma tubulação de INOX 316 e passam por um trocador de calor a água (TC1). O trocador de calor é caracterizado por um béquer de vidro imerso em uma caixa plástica contendo água e gelo. A passagem do escoamento pelo béquer resfria os gases reformados até atingirem a temperatura ambiente ($25^\circ C$), para que possam seguir para a análise no cromatógrafo gasoso (CG1). No cromatógrafo gasoso, as frações molares de cada espécie química contida no escoamento de gases reformados são obtidas.

3.1.1 Projeto mecânico do reformador

O sistema de reforma projetado no presente trabalho foi desenvolvido para operação em elevadas temperaturas, aproximadamente $700^\circ C$. Para tanto, utilizou-se como material de construção o aço INOX 310, com composição de 25% de cromo, 20% de níquel e 0,6% de silício. Possui grande resistência à oxidação em altas temperaturas (até $1150^\circ C$). Sua baixa condutividade térmica ($13,5 W/m.K$), quando comparada à aços carbono ($\approx 64 W/m.K$), contribui para a minimização de perdas de energia térmica para o ambiente. No Apêndice são apresentados todos os desenhos mecânicos do projeto do reator utilizado para a fabricação das peças.

3.1.1.1 Cálculo de resistência mecânica da estrutura

As resistências mecânicas dos sistemas aquecedor, evaporador e reator foram calculadas de acordo com o código ASME (2019), sendo a parte específica que trata dos requisitos necessários para o projeto e a fabricação de vasos sob pressão. Embora o sistema reformador não tenha previsão para operação em pressões internas diferentes da pressão atmosférica, a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) do módulo de aquecimento do ar e do módulo que compõem o evaporador + reator foi

Tabela 2 – Descrição dos equipamentos mecânicos utilizados na construção da bancada.

Nº	Item	Fabricante	Características
CP1	Compressor de pistão	Schulz	Compressor de ar a pistão.
TC1	Trocador de calor	Não identificado	Bequer de vidro com dois orifícios (entrada de gás quente e saída de gás resfriado), imerso em água e gelo.
T1	Tanque de N ₂	Air liquide	Reservatório de N ₂ industrial com pureza de 99%.
T2	Tanque de água/etanol	Fabricado internamente	Reservatório da mistura água e etanol, fabricado em INOX 304, volume de aproximadamente 3,5 litros.
VA1	Vela de aquecimento	NGK	Vela de aquecimento automotiva, modelo Y1002AS.
BI1	Bico injetor	MHX	Bico injetor da motocicleta BIZ 125, com 6 orifícios.
R1	Reator / Evaporador	Fabricado internamente	Sistema reator e evaporador, fabricado com chapa de aço INOX 310 de espessura 2 mm de forma calandrada e soldada.
AQ1	Sistema de aquecimento do ar	Não identificado	Sistema constituído de duas resistências elétricas do tipo cruzeta ligadas em série, com tensão de 220 volts e potência de 3,0 kW cada.
AQ2	Sistema de aquecimento do reator	Fabricado internamente	Sistema de aquecimento construído no laboratório com fio de Khantal fornecido pela empresa Supersteel, de espessura 2,052 mm, resistividade de 0,4384 ohm/m. Tensão de operação em 220 volts e potência total de 3,5 kW.
T3	Tanque da mistura (H ₂ +N ₂)	Air liquide	Mistura dos gases para ativação do catalisador. Composição em 95% de N ₂ e 5% de H ₂ .
RP1, RP2, RP3	Reguladores de pressão	Não identificado	Regulador de pressão com manômetro de 0 a 20 bar.
MAN1	Manômetro analógico	Não identificado	Manômetro horizontal de diâmetro 2" com escala de 0 a 20 bar.
-	Tubos de fluidos frios	Não identificado	Tubulação de poliuretano (PU) de diâmetro 6 mm, utilizado em fluidos com temperatura ambiente.
-	Tubos de fluidos quentes	Swagelok	Tubulação de aço INOX 316 com diâmetro 1/4", rosca NPT, utilizado em fluidos com temperatura acima da temperatura ambiente.
VE1, VE2, VE3	Válvulas de esfera	Swagelok	Válvulas de esfera para o interrompimento manual do escoamento, com rosca fêmeas 1/4"NPT.

Fonte: Autor.

determinada como 0,100 MPa como um fator de segurança, caso a pressão interna exceda por motivos de ignição da mistura ou por razões inesperadas. O sistema possui abertura para atmosfera, então em qualquer eventual sobre pressão do sistema, o escoamento é direcionado para a atmosfera. Sendo assim, baseado na PMTA atribuída ao sistema, foi calculada a espessura requerida da chapa de INOX 310 utilizada na construção.

O parágrafo UG-27, do código ASME Seção VIII, trata da espessura requerida

Tabela 3 – Descrição dos equipamentos elétricos e de controle utilizados na construção da bancada.

Nº	Item	Fabricante	Características
CV1	Controlador de vazão	Alicat	Controlador de vazão de N ₂ , capacidade de 100 litros por minuto, modelo MCH-100SLPM-D/5M, incerteza de medição em 1% no fundo de escala.
CV2	Controlador de vazão	Alicat	Controlador de vazão do ar, capacidade de 10 litros por minuto, modelo M-10SLPM-D/5M, incerteza de medição em 1% no fundo de escala.
CT1	Controlador de temperatura	Novus	Controlador de temperatura do ar, modelo N-1040, resolução de 0,1 °C.
CT2	Controlador de temperatura	Novus	Controlador de temperatura da mistura água/etanol, modelo N-2000, resolução de 1 °C.
CT3	Controlador de temperatura	Flyever	Controlador de temperatura do reator, modelo FE50RPN, resolução de 1 °C.
ST1, ST2, ST3, ST4	Sensores de temperatura	Omega	Sensor de temperatura, tipo K, incerteza de 0,75%.
CG1	Cromatógrafo gasoso	PerkinElmer	Cromatógrafo gasoso para análise dos gases reformados, modelo Clarus 580 GC.
AQT1	Aparelho de aquisição de dados	Agilent	Sistema de aquisição de dados modelo 34972A.
CPWM	Placa PWM	Não identificado	Sistema eletrônico gerador de sinais PWM para o controle da vazão do bico injetor, tensão de trabalho 24 VCC (volt em corrente contínua).
-	Contatores de acionamento	Eaton	Contatores elétricos utilizados para o controle da tensão aplicada ao sistema de aquecimento dos reagentes líquidos e para o sistema de aquecimento do ar. Modelo DIL M50.
-	Disjuntores de entrada	Schneider	Disjuntor elétrico monofásico de entrada de energia no painel. Modelo C20.

Fonte: Autor.

para cascos de vasos sujeitos à pressão interna. Para a tensão que atua de maneira circunferencial (junta longitudinal) em um vaso, a espessura requerida, é definida pela Equação (4) a seguir.

$$e_c = \frac{PMTAR}{S_{INOX}E - 0,6PMTA}, [mm] \quad (4)$$

Para a tensão longitudinal (junta circunferencial) atuante no vaso, a espessura requerida, é definida pela Equação (5) a seguir.

$$e_l = \frac{PMTAR}{2S_{INOX}E + 0,4PMTA}, [mm] \quad (5)$$

Onde, e_c e e_l são as espessuras requeridas, em milímetros, para a chapa de INOX nas tensões circunferencial e longitudinal, respectivamente. S_{INOX} é a tensão

admissível do aço INOX 310, em MPa. E é a eficiência da solda. O maior resultado de espessura para os cálculos acima deve ser usado.

O parágrafo UG-34 do código ASME Seção VIII, estabelece requisitos para o projeto de tampos aplicados em vasos de pressão. Os tampos utilizados no projeto foram tampos planos não estaiados. A espessura mínima requerida para tampos circulares não estaiados é calculada pela Equação (6) a seguir.

$$e_t = 2R \sqrt{\left(\frac{PMTAC}{S_{INOX}E}\right)}, [mm] \quad (6)$$

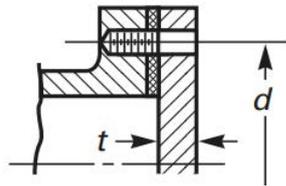
Onde, e_t é a espessura requerida para tampos planos, em mm, e o fator adimensional C irá depender do tipo de fixação do tampo ao vaso. A denominação das demais variáveis são as mesmas já definidas anteriormente.

A definição do tampo influencia no cálculo da sua espessura requerida, a Figura 7 mostra os dois tipos de fixação dos tampos empregados neste projeto. O módulo de aquecimento do ar possui fixação do tampo ao corpo do vaso de forma aparafusada por flange, conforme croqui demonstrado na Figura 7a. A parte inferior do módulo de evaporação + reator, onde se localiza o evaporador, também foi utilizado tampo aparafusado por meio de flange. Nestes casos, o fator adimensional C utilizado para o cálculo da espessura requerida para os tampos da Equação (6) é 0,25. Já o tampo superior do módulo que constitui o reator + evaporador utiliza tampo soldado ao corpo do vaso na saída de gases reformados, seguindo a forma construtiva como ilustra a Figura 7b, e neste caso utiliza-se o fator adimensional C de 0,33 (ASME, 2019).

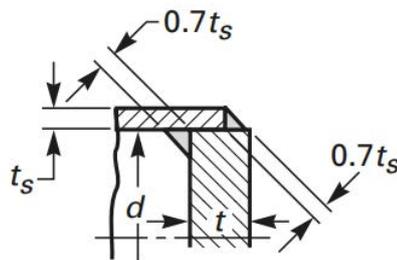
O sistema de reforma auto térmica projetado é composto de três principais módulos, sendo o módulo de aquecimento do ar, módulo de evaporação e o reator, identificados na Figura 8. Os valores calculados de espessura requerida para os módulos de aquecimento do ar e do reator + evaporador estão dispostos na Tabela 4. Para os cálculos da resistência do casco, o módulo reator + evaporador foram considerados como uma peça única, uma vez que possuem o mesmo raio interno.

O valor de E , utilizado na Equação (4), Equação (5) e Equação (6) foi determinado de acordo com o parágrafo UW-12 do código ASME. O valor utilizado foi de 0,70, que corresponde ao tipo de solda de topo, feita por ambos os lados, de forma a obter penetração e fusão total, e o grau de inspeção foi de não radiografado. O valor de S_{INOX} foi determinado a partir da tabela UCS-23 do código ASME. O valor de tensão admissível do material INOX 310 varia com as mudanças de temperatura, diante disso, foram usados dois valores, ou seja, uma tensão admissível para cada temperatura de projeto atribuída. Para a região do reator + evaporador a temperatura de projeto foi estabelecida em 700 °C, e o valor de tensão admissível do material foi de 70 MPa, e um valor para a tensão admissível de 105 MPa para a região de aquecimento do ar, em uma temperatura de projeto de 300 °C.

Figura 7 – Croquis das formas de fixação dos tampos empregadas neste projeto.



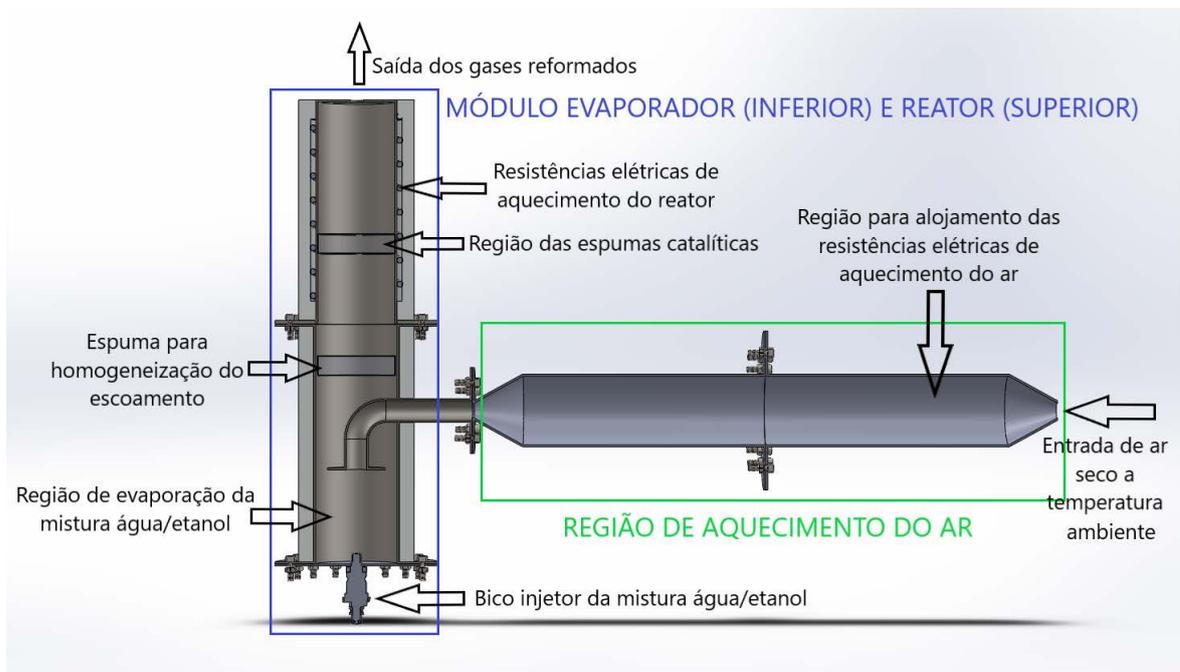
(a) Croqui do tampo aparafusado.



(b) Croqui do tampo soldado ao corpo.

Fonte: Adaptado de ASME (2019).

Figura 8 – Vista em corte do sistema reformador, identificando: o módulo de aquecimento do ar, o módulo de evaporação e reator.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Dados de projeto da construção do sistema reformador e espessuras requeridas.

Parte do sistema	Temperatura de Projeto [°C]	S_{INOX} [MPa]	Espessura Requerida [mm]	Espessura Utilizada [mm]
Tampos aparafusados do aquecedor de ar	300	105	1,40	2,00
Tampo soldado na saída de gases	700	70	1,97	2,00
Tampo aparafusado no evaporador	700	70	1,80	2,00
Casco do aquecedor de ar	300	108	0.05	2,00
Casco do sistema evaporador + reator	700	70	0.10	2,00

Fonte: Autor.

3.1.1.2 Cálculo de potência requerida para evaporação

O sistema de aquecimento do ar foi desenvolvido em duas partes, flangeadas uma a outra, com intuito de facilitar as manutenções, como troca de resistências elétricas, trocas de juntas de vedação e limpezas em geral. O sistema de aquecimento do ar foi projetado com espaço suficiente para o alojamento de duas resistências elétricas do tipo cruzeta, conforme já ilustrado na Figura 8.

A região de evaporação é o local onde o escoamento de ar aquecido encontra o jato de escoamento dos reagentes líquidos (mistura de água e etanol), fornecido pelo bico injetor. O sistema de evaporação foi desenvolvido baseando-se no sistema proposto por Moser (2011), a fim de otimizar a evaporação dos reagentes em contato com o ar aquecido. Desta forma, o escoamento de ar aquecido, fornecido pelas resistências do tipo cruzeta, entra na região de evaporação em contra corrente ao escoamento de líquidos, favorecendo a homogeneização e turbilhonamento da mistura, e como consequência, a evaporação dos reagentes líquidos.

Como otimização de evaporação, o sistema de pré aquecimento pela vela é pressurizado a 3 bar, então espera-se que parte do escoamento sofra uma evaporação *flash* na entrada do sistema evaporador. Adicionalmente, foi desenvolvido, um anel circular soldado ao final do tubo de saída do ar aquecido, no final da região de evaporação, com o objetivo de evaporar pequenas gotículas da mistura água e etanol

não vaporizadas na região de evaporação, pois o anel circular restringe a passagem do escoamento, fazendo com que as gotículas que entrem em contato com essa área circular aquecida, sofram uma completa evaporação. Esta área circular pode ser visualizada projeção em 2D do projeto na Figura 8.

O sistema reformador foi projetado para operar em diferentes temperaturas, e para diferentes temperaturas são necessárias diferentes vazões de reagentes, como será explicado com detalhes na seção 3.3 do Capítulo 3. Diante disso, os cálculos da potência necessária para a evaporação dos reagentes líquidos foram baseados na situação onde necessitaria a maior vazão de reagentes, ou seja, 2,00 mL/s de água e 1,86 mL/s de etanol, conforme mencionado a seguir na Tabela 16.

A entalpia de vaporização da água e do etanol, à pressão de 1 atm é de 2257 kJ/kg e 838,3 kJ/kg, respectivamente. Os calores específicos da água e do etanol são 4,22 kJ/kg.K e 2,46 kJ/kg.K, respectivamente. Assim pode-se calcular a potência requerida para vaporização da água, de acordo com a Equação (7) (CENGEL; GHAJAR, 2009).

$$q_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \left(c_{p_{H_2O}} \Delta T \right) + h_{fg_{H_2O}}, [kW] \quad (7)$$

De forma análoga, pode-se calcular a potência necessária para a evaporação do escoamento mássico de etanol, conforme a Equação (8) a seguir.

$$q_{C_2H_5OH} = \dot{m}_{C_2H_5OH} \left(c_{p_{C_2H_5OH}} \Delta T \right) + h_{fg_{C_2H_5OH}}, [kW] \quad (8)$$

Desta forma, a potência total requerida para a evaporação do escoamento de 2,00 mL/s de água e 1,86 mL/s de etanol é a soma da Equação (7) e Equação (8), resultando em uma potência necessária de 6,30 kW.

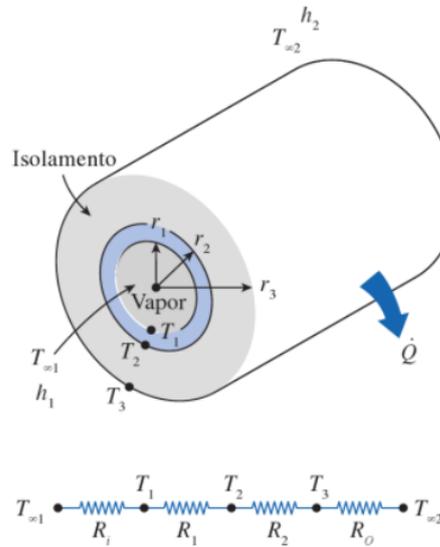
Neste caso foram instaladas duas resistências do tipo cruzeta, com potência de 3 kW cada, totalizando em 6 kW de potência instalada no aquecedor de ar. A maneira de ligação do sistema elétrico, cálculos de resistência ôhmica, corrente nominal e controle do sistema aquecedor de ar, serão abordados na seção 3.1.2.

3.1.1.3 Considerações térmicas e hidrodinâmicas das seções de aquecimento do ar e evaporação

Para sistemas térmicos que operam em elevadas temperaturas, a análise dos mecanismos envolvidos nas transferências de calor são indispensáveis, bem como a avaliação das propriedades físicas envolvidas no processo. Adicionalmente, isolamento térmico é indispensável para evitar perdas significativas de energia para o meio externo. Foi analisado a perda de energia térmica no sistema aquecedor de ar e evaporador. Os sistemas foram equipados com isolante térmico de fibra de cerâmica. A representação

esquemática dos sistemas aquecedor de ar e evaporador, e as resistências térmicas envolvidas, podem ser comparados com a Figura 9.

Figura 9 – Representação esquemática de um sistema de condução em um cilindro isolado.



Fonte: (CENGEL; GHAJAR, 2009).

Pode-se perceber que a rede de resistência térmica envolve quatro resistências em série, sendo: a resistência relacionada à convecção interna do ar aquecido, a condução de calor pela parede do tubo de INOX, a condução de calor pelo isolante térmico e a resistência de convecção externa (convecção natural), e podem ser calculadas de acordo com a Equação (9), Equação (10), Equação (11) e Equação (12), respectivamente.

$$R_{conv,1} = \frac{1}{h_1 A_1}, [^{\circ}C/W] \quad (9)$$

$$R_{tubo} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L_{tubo}}, [^{\circ}C/W] \quad (10)$$

$$R_{isol} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L_{isol}}, [^{\circ}C/W] \quad (11)$$

$$R_{conv,2} = \frac{1}{h_2 A_3}, [^{\circ}C/W] \quad (12)$$

As áreas das superfícies expostas à convecção A_1 e A_3 , são calculadas de acordo com Equação (13) e Equação (14), respectivamente.

$$A_1 = 2\pi r_1 L_{tubo}, [m^2] \quad (13)$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L_{isol}, [m^2] \quad (14)$$

Assim, a resistência total do sistema é a soma de todas as resistências, conforme a Equação (15).

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{tubo} + R_{isol} + R_{conv,2}, [^{\circ}C/W] \quad (15)$$

Desta forma, a taxa de perda de calor para o ambiente a partir do escoamento de ar quente pode ser definida conforme Equação (16). Considerando as hipóteses de transferência de calor de forma permanente, unidimensional, que há uma simetria térmica na linha central e sem variação na direção axial e que as condutividades térmicas são constantes.

$$\dot{Q}_{perda} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{total}}, [W] \quad (16)$$

Para um correto cálculo da perda de energia decorrente da condução por meio das resistências, o cálculo dos coeficientes convectivos do escoamento interno (h_1) e escoamento externo, ou seja, convecção natural (h_2), são necessários.

Além da análise das perdas de calor para o ambiente por meio dos mecanismos de convecção e condução, foram analisadas as perdas de energia térmica por meio da radiação, expressa pela Equação (17).

$$\dot{Q}_{perda,rad} = \epsilon A_{sup,2} \sigma (T_{s,rad}^4 - T_{\infty,3}^4), [W] \quad (17)$$

As correlações utilizadas abaixo seguem os dispostos em Cengel e Ghajar (2009) e Bergman *et al.* (2011). A análise do coeficiente convectivo interno inicia-se pelo cálculo do número de Reynolds, conforme Equação (18). Para tal cálculo o valor de 17 litros por minuto de vazão de ar foi estabelecido, devido à dissipação da energia térmica das resistências elétricas. Para vazões menores de 17 litros por minuto, os fios resistivos acabam se rompendo devido à não dissipação da energia à corrente de ar.

$$Re_D = \frac{\rho_{ar} U_m D_{int}}{\mu}, [-] \quad (18)$$

De acordo com o valor de Reynolds, para todas as vazões utilizadas neste trabalho, pode-se concluir que o escoamento é laminar. Pode-se concluir também, que o escoamento se encontra em desenvolvimento na região de entrada do tubo, ou seja, o escoamento não está totalmente desenvolvido termicamente e hidrodinamicamente, conforme Equação (19) e Equação (20), visto que o comprimento do aquecedor de ar é de 504 mm e o sistema evaporativo é de aproximadamente 250 mm.

$$L_{h,laminar} \approx 0,05 Re_D D_{int}, [m] \quad (19)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0,05 Re_D D_{int} Pr, [m] \quad (20)$$

O número de Nusselt médio para escoamento laminar em desenvolvimento em tubos circulares é dado pela correlação Equação (21). Nesta correlação todas as propriedades do fluido são avaliadas em temperatura média, ou seja a metade da soma das temperaturas de entrada e saída, exceto μ_s que é avaliada a temperatura de superfície (CENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Nu = 1,86 \left(\frac{Re_D Pr D_{int}}{L_{tubo}} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14}, [-] \quad (21)$$

Com isso podemos definir o coeficiente médio de transferência de calor por convecção interna (h_{int}), de acordo com a Equação (22).

$$h_{int} = \left(\frac{Nu k_{ar}}{D_{int}} \right), [W/m^2.K] \quad (22)$$

O sistema aquecedor de ar, está sujeito a uma convecção natural sobre sua superfície. E a intensidade dessa transferência de calor depende da geometria da superfície exposta bem como de sua orientação. Uma correlação largamente utilizada é a correlação do número de Rayleigh, que é definido como a razão entre as forças de flutuação e o produto das difusividades térmicas e de quantidade de movimento, definido pela Equação (23) (CENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty,2}) L_c^3}{\nu^2} Pr, [-] \quad (23)$$

Todas as propriedades do fluido na Equação (23) são avaliadas na temperatura de filme, ou seja, a metade da soma das temperaturas de superfície e do ambiente.

Para a determinação do número de Nusselt, a correlação empírica da Equação (24) pode ser utilizada. Esta correlação se aplica a escoamentos em convecção natural sobre cilindros em disposição horizontal, e o comprimento característico (L_c) é o diâmetro externo do cilindro. Esta correlação só pode ser usada em situações onde o número de $Ra_L \leq 10^{12}$ (BERGMAN *et al.*, 2011).

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2, [-] \quad (24)$$

Desta maneira, podemos definir o coeficiente médio de transferência de calor por convecção externa (convecção natural) (h_{ext}), de acordo com a Equação (25).

$$h_{ext} = \left(\frac{Nu k_{ar}}{D_{ext}} \right), [W/m^2.K] \quad (25)$$

A análise térmica e hidrodinâmica para o escoamento interno e externo do sistema evaporador segue a mesma analogia já apresentada para o sistema aquecedor de ar. Para a obtenção das perdas de energia por condução para o ambiente (\dot{Q}_{perda}), número de Reynolds do escoamento (Re_D), comprimento da região de entrada térmica e hidrodinâmica do escoamento no tubo ($L_{h,laminar}$ e $L_{t,laminar}$), número de Nusselt (Nu), número de Rayleigh (Ra_L), e definição do coeficiente convectivo interno e externo (h_1 e h_2), a Equação (16), Equação (18), Equação (20), Equação (19), Equação (21), Equação (23), Equação (22) e Equação (25) são utilizadas, conforme apresentadas anteriormente.

Como exceção, o número de Nusselt (Nu) para o escoamento externo do evaporador, na análise de convecção natural, usa-se a correlação determinada pela Equação (26). Neste caso, a geometria da superfície difere do aquecedor de ar, neste caso o cilindro encontra-se na vertical, e pode ser aproximado como um placa vertical, com aplicação para toda a faixa de número de Ra_L (CENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2, [-] \quad (26)$$

Para a análise do escoamento interno do evaporador, as propriedades do fluido são definidas parcialmente, pois nesta região há uma mistura de fluidos (água/etanol/ar). Como uma aproximação do escoamento assume-se também que os fluidos estão todos na fase gasosa e despreza-se a mudança de fase.

Os resultados e discussões mais detalhadas das análises térmicas e fluidodinâmicas dos sistemas aquecedor de ar e evaporador são apresentados na Capítulo 4.

3.1.1.4 Considerações térmicas, hidrodinâmicas e cálculo da potência requerida no aquecimento do reator

O módulo da região onde ocorre a reforma (reator) foi desenvolvido em dimensões apropriadas para alojar 4 espumas catalisadoras de diâmetro de 80 mm e espessura de 20 mm. Para manter uma temperatura isotérmica durante a reforma auto térmica do etanol, um aquecimento adicional nesta região foi necessário. Devido à grande dificuldade em encontrar aquecedores comerciais para as dimensões específicas do reator, e devido à necessidade de alcançar uma temperatura de aproximadamente 700°C no interior do reator, um sistema de aquecimento foi desenvolvido internamente no laboratório.

A região onde ocorre a reforma auto térmica do etanol, designada reator, necessita atingir a temperatura de reforma o mais rápido possível. Tal procedimento é um desafio, tendo em vista que no interior do reator se encontram quatro espumas cerâmicas, com condutividade térmica na ordem de 39 W/m.K e com escoamento interno na fase laminar (Reynolds na faixa de 10^0 a 10^3).

Avaliar o coeficiente convectivo em espumas porosas e com temperaturas elevadas em um valor preciso é um enorme desafio. Para este trabalho, uma correlação proposta por Peng e Richardson (2004) foi implementada para a determinação do coeficiente convectivo do escoamento interno no reator através das espumas. A equação Equação (27) define o coeficiente convectivo em função do número de Reynolds.

$$h_{espuma} = 6,58 Re_s^{0,584}, [W/m^2.K] \quad (27)$$

O número de Reynolds para a superfície específica da espuma é definido pela Equação (28).

$$Re_s = \left(\frac{\dot{m}_{mix}}{\mu_{mix} S_v A_{tr}} \right), [-] \quad (28)$$

A área de superfície externa por volume sólido é dada pela Equação (29).

$$S_v = \frac{4\varepsilon}{d_p(1-\varepsilon)}, [m^{-1}] \quad (29)$$

Assim pode-se calcular a área superficial das espumas, baseado no volume total que elas ocupam no interior do reator. A área superficial é calculada para quatro espumas cerâmicas, e é dada pela Equação (30).

$$A_{sup,esp} = S_v V_{espumas}, [m^2] \quad (30)$$

As correlações apresentadas, são uma estimativa do coeficiente interno de convecção, o qual servirá para o cálculo da potência necessária para aquecimento do reator a 700°C, sendo assim, foi desprezada a difusão de calor e massa ao longo das espumas, bem como gradientes de temperatura internos na espuma, e nenhuma condução interna foi considerada. Sendo assim, a potência requerida para o aquecimento do reator pode ser calculada pela lei de resfriamento de Newton, expressa pela Equação (31).

$$\dot{Q}_{reator} = h_{espuma} A_{sup,esp} (T_s - T_\infty), [W] \quad (31)$$

As correlações acima, apresentadas pela Equação (27), Equação (28), Equação (29) e Equação (30), foram implementadas em Python, utilizando o pacote Cantera para determinar a viscosidade da mistura (μ_{mix}). Para a determinação do coeficiente convectivo mais crítico, foi considerada a menor vazão da mistura ar/água/etanol,

pois neste caso o sistema necessita da maior potência para manter o sistema aquecido, visto que o número de Reynolds é baixo. Considerando a porosidade da espuma no valor de $\varepsilon = 0,86$, o diâmetro médio dos poros da espuma no valor de $d_p = 0,385 \times 10^{-3}$ m, e vazão crítica da mistura (menor vazão) em $\dot{m}_{mix} = 1,792 \times 10^{-4}$ kg/s, o menor coeficiente convectivo encontrado foi de $h_{espuma} = 2,46$ W/m².K.

Baseado neste valor de coeficiente convectivo, a potência necessária, calculada pela Equação (31), para aquecimento do reator foi de $\dot{Q}_{reator} = 3483$ Watt. Maiores discussões, acerca dos resultados de análise térmica dos sistemas, são apresentadas no Capítulo 4.

A construção do sistema de aquecimento do reator foi desenvolvido com a construção de uma resistência de fio KHANTAL A1, com uma composição de 22% de cromo, 5,5% de alumínio, 0,5% de cobre e o restante de ferro, fornecido pela empresa Supersteel. O diâmetro do fio utilizado para a construção da resistência foi de 2,052 mm, com resistência de 0,4384 ohm/metro. O comprimento da resistência foi o suficiente para que o sistema forneça uma potência de 3500 W, com uma corrente nominal em torno de 16 Amperes.

A análise das características térmicas de perdas para o ambiente do sistema de aquecimento do reator é análoga ao sistema de evaporação e aquecimento de ar, já apresentadas anteriormente. Com exceção ao comprimento característico, pois no caso da isolação do sistema de aquecimento do reator as paredes são planas, logo a correlação utilizada é a mesma apresentada na Equação (23), porém o comprimento característico (L_c) atribuído à correlação é a altura das paredes do sistema aquecedor do reator. A determinação do número de Nusselt (Nu) é feita de acordo com a Equação (26), que é válida para todas as faixas de (Ra_L) para uma geometria de placa vertical.

O sistema de resistências de aquecimento do reator foi isolado termicamente utilizando placas de fibra cerâmica de densidade de 320 kg/m³ e temperatura máxima de operação de 1400 °C, com uma espessura de 25 mm, fornecida pela empresa OBR Isolantes. Os módulos de evaporação e de aquecimento do ar foram isolados com manta de fibra cerâmica, com densidade de 160 kg/m³ e temperatura máxima de operação de 1400 °C.

Discussões detalhadas sobre a efetividade dos sistemas de isolação térmica são apresentadas no Capítulo 4.

3.1.2 Projeto do sistema elétrico de controle

A construção do sistema elétrico é fundamentada pela potência necessária para a vaporização da mistura água e etanol, bem como pela potência necessária para o aquecimento do reator. Desta forma, conhecendo as potências requeridas e a tensão de trabalho, o cálculo da corrente elétrica do circuito é calculada pela Equação (32) a

partir da lei de ohm (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$I_c = \frac{P_T}{V_c}, [A] \quad (32)$$

Para o sistema de aquecimento do ar, foram utilizadas duas resistências cruzetas com potência de 3 kW cada uma. As resistências de aquecimento do ar foram ligadas em série, e diante disso a corrente elétrica é a mesma em todo o percurso das resistências, neste caso a corrente calculada foi de aproximadamente 15 A.

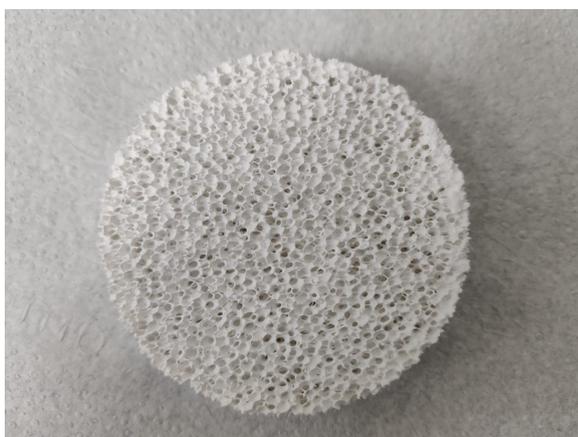
Para o sistema de aquecimento do reator, a potência necessária é de aproximadamente 3500 W, neste sentido, a corrente elétrica percorrida no circuito é de aproximadamente 16 A.

Para a realização dos cálculos, a tensão elétrica (V_c) foi de 220 V. Diante disso, os componentes do sistema elétrico, tais como, disjuntores, contadores, terminais, fios de ligação e bornes, foram selecionados para que suportassem uma corrente acima de 20 A.

3.2 MONÓLITO CATALÍTICO

O catalisador é composto por um monólito a base de Ni/Al₂O₃. As espumas comerciais de Al₂O₃ foram adquiridas da empresa Tecnicer Cerâmica, com poros de 40 ppi (poros por polegada), 20 mm de espessura e 80 mm de diâmetro, e foram utilizadas como suporte para o monólito conforme ilustrada na Figura 10. Foi usada uma espuma de 10 ppi para homogeneização do fluxo com as mesmas dimensões, conforme ilustrada na Figura 11. A espuma com impregnação de Níquel é demonstrada na Figura 12.

Figura 10 – Espuma Al₂O₃ sem impregnação.



Fonte: Autor.

A síntese do catalisador sobre as espumas cerâmicas é parte do trabalho desenvolvido por Zeitoune (2023) no LAC (Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas)

Figura 11 – Espuma Al_2O_3 sem impregnação, para homogeneização.



Fonte: Autor.

Figura 12 – Espuma Al_2O_3 com impregnação de Níquel.



Fonte: Autor.

da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC Campus Joinville e adaptada da metodologia proposta por Agrafiotis e Tsetsekou (2000) e Palm (2018). Uma descrição detalhada sobre o procedimento e caracterização também pode ser visualizada em Vidal *et al.* (2022). Aqui, apenas os principais aspectos da síntese dos monólitos serão abordados visando melhor compreensão do trabalho.

Para produzir o *washcoat*, uma pasta foi preparada misturando pó de alumina

com partículas de 0,5 a 2 μm de diâmetro (CT 3000 LS SG fornecido pela Almatris) com água destilada por 1 hora usando um agitador magnético. Em seguida, silicato de sódio (1 wt%) e ácido nítrico (1 wt%) foram adicionados e a solução foi agitada por mais 2 h. O pH da solução foi controlado entre 4 e 4,5. Uma pasta com 40% de concentração em massa de alumina foi preparada. Antes do revestimento, as espumas foram secas a 110 °C por 1 hora e pesadas em balança analítica. As espumas foram então imersas na pasta por 1 min. Após a imersão, o excesso de pasta foi removido colocando as espumas em contato com um papel absorvente. As espumas foram secas a 110 °C por 90 min, com taxa de aquecimento de 6 °C min⁻¹ para eliminar solventes e resíduos, e depois calcinadas a 600 °C por 2 h a uma taxa de 6 °C/min.

A impregnação da fase ativa foi baseada na metodologia utilizada por Pinna (1998), Palm (2018), e Palm *et al.* (2020). Um precursor de Ni foi preparado usando uma solução aquosa de nitrato de níquel hexa-hidratado ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 97% de pureza, fornecido pela VETEC) com uma concentração de 2,5 M. As espumas foram então imersas na solução por 16 h, secas a 150 °C por 24 h com taxa de aquecimento de 6 °C/min e calcinado a 700 °C por 2 h, com taxa de aquecimento de 6 °C/min.

3.3 CÁLCULO DE VAZÕES DE REAGENTES E POTÊNCIA NOMINAL

O método para calcular a vazão de reagentes a ser testada na bancada experimental é baseado na premissa do posterior uso do H_2 em uma célula a combustível. Portanto, o cálculo de potência nominal refere-se a potência teoricamente produzida em uma célula a combustível, dadas as vazões de reagentes definidas. Para o cálculo das vazões de reagentes, a seguinte metodologia foi aplicada.

Uma célula a combustível usa hidrogênio e oxigênio como combustível para realizar reações e gerar energia elétrica. Para sistemas embarcados em veículos automotores, o escoamento de oxigênio para a célula de combustível ocorre através da circulação de ar com o carro em movimento, enquanto o hidrogênio é obtido através de uma reforma catalítica (REVANKAR; MAJUMDAR, 2016). Dessa forma, é possível calcular as vazões de combustível e oxidante para alimentação de células a combustível. O escoamento mássico de hidrogênio pode ser calculado pela Equação (33), de acordo com a potência da célula que se pretende alimentar.

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{M_{\text{H}_2} P_T}{n_e F V_c}, [\text{kg/s}] \quad (33)$$

onde, $M_{\text{H}_2} = 2.02 \times 10^{-3}$ (kg/mol) é a massa molecular do hidrogênio, $n_e = 2$ é o número de elétrons envolvidos na reação oxigênio-hidrogênio, $F = 96485$ C/mol é a constante de Faraday, P_T é a potência de saída da célula a combustível (W) e V_c é a tensão da célula em Volts (V), definida pela Equação (34).

$$Vc = E_{rev}\eta_{fc} \quad (34)$$

Na Equação (34), E_{rev} é o valor de tensão reversível da célula de combustível, o qual depende somente da temperatura de operação da célula (REVANKAR; MAJUMDAR, 2016). Para o presente trabalho, o valor de E_{rev} foi de 1,035 Volts para uma célula a combustível operando a uma temperatura de 600 °C. A eficiência, η_{fc} , foi estabelecida em 60%, de acordo com o estudo de Tippawan e Arpornwichanop (2014), que definiram, em estudo termodinâmico da reforma auto térmica do etanol, pontos ótimos de operação.

Portanto, a vazão molar de H_2 pode ser expressa como a razão do escoamento mássico de H_2 pelo peso molecular de H_2 , definido pela Equação (35).

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{M_{H_2}}, [mol_{H_2}/s] \quad (35)$$

A Equação (33) e a Equação (35) demonstram a quantidade de hidrogênio necessária para alimentar uma célula a combustível. Com base nessa quantidade de hidrogênio, necessária para alimentar a célula, é possível calcular o escoamento necessário de etanol para alimentar o reator, expresso pela Equação (36).

$$\dot{n}_{C_2H_5OH} = \frac{\dot{n}_{H_2}}{H_{2produzido}}, [mol_{C_2H_5OH}/s] \quad (36)$$

Na Equação (36), o $H_{2produzido}$ ($mol_{H_2}/mol_{C_2H_5OH}$) é a quantidade de moles de hidrogênio produzido no reator por mol de etanol na alimentação do reator, obtida em um processo de reforma do etanol, que por sua vez, pode ser uma reforma a vapor (SR), uma reforma auto térmica (ATR) ou uma reforma de oxidação parcial (POX). O $H_{2produzido}$ é obtido pelo equilíbrio químico via minimização da energia livre de Gibbs, e são calculados para diferente valores de temperatura. O código foi desenvolvido pelo autor utilizando a plataforma de código aberto Python, usando o pacote Cantera.

Dessa forma, o escoamento mássico de etanol pode ser facilmente obtido, multiplicando sua vazão molar pelo seu peso molecular, expresso pela Equação (37).

$$\dot{m}_{C_2H_5OH} = \dot{n}_{C_2H_5OH}M_{C_2H_5OH}, [kg/s] \quad (37)$$

Como mencionado anteriormente, a reforma do etanol pode ser alcançada por meio de três processos principais, definidos como SR, ATR e POX. Na SR, a alimentação no reator se dá por vapor d'água e etanol, na POX a alimentação se dá por oxigênio e etanol e na ATR a alimentação é feita com etanol, vapor d'água e oxigênio. Desta forma, se faz necessário conhecer as proporções mássicas dos reagentes do reator, para isso a Equação (38) e a Equação (39) convertem as razões molares da alimentação em razões mássicas de S/E e O/E na alimentação do reator.

$$R_{massa_{S/E}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{C_2H_5OH}} \frac{M_{H_2O}}{M_{C_2H_5OH}} \quad (38)$$

$$R_{massa_{O/E}} = \frac{n_{O_2}}{n_{C_2H_5OH}} \frac{M_{O_2}}{M_{C_2H_5OH}} \quad (39)$$

Assim, podemos definir facilmente o escoamento mássico de água e oxigênio para a alimentação do reator, com base na vazão mássica de etanol, expresso pela Equação (40) e Equação (41).

$$\dot{m}_{H_2O} = R_{massa_{S/E}} \dot{m}_{C_2H_5OH}, [kg/s] \quad (40)$$

$$\dot{m}_{O_2} = R_{massa_{O/E}} \dot{m}_{C_2H_5OH}, [kg/s] \quad (41)$$

Finalmente, as vazões volumétricas de cada fluido de alimentação do reator podem ser definidas, como mostram a Equação (42), Equação (43) e a Equação (44).

$$\dot{V}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, [m^3/s] \quad (42)$$

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\rho_{O_2}}, [m^3/s] \quad (43)$$

$$\dot{V}_{C_2H_5OH} = \frac{\dot{m}_{C_2H_5OH}}{\rho_{C_2H_5OH}}, [m^3/s] \quad (44)$$

onde, ρ_{H_2O} , ρ_{O_2} e $\rho_{C_2H_5OH}$ são as densidades da água, oxigênio e etanol, em kg/m^3 , respectivamente. As densidades dos fluidos são avaliadas a temperatura ambiente, pois as vazões são medidas antes de qualquer aquecimento.

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção apresenta-se a metodologia de calibração do bico injetor, bem como o roteiro detalhado para a operação da bancada.

3.4.1 Calibração do bico injetor

A calibração da vazão do bico injetor foi realizada utilizando o método gravimétrico, que consiste na utilização de uma balança para mensurar a massa descarregada pelo bico em determinado período de tempo. A balança analítica utilizada tem capacidade de medição de 220 gramas com desvio máximo de 0,0001 g, possui marca Shimadzu e modelo ATX 224.

Este método de calibração foi realizado por meio da pressurização do tanque de mistura água/etanol a 3 bar. A razão molar da mistura água/etanol utilizada foi de 1,5:1.

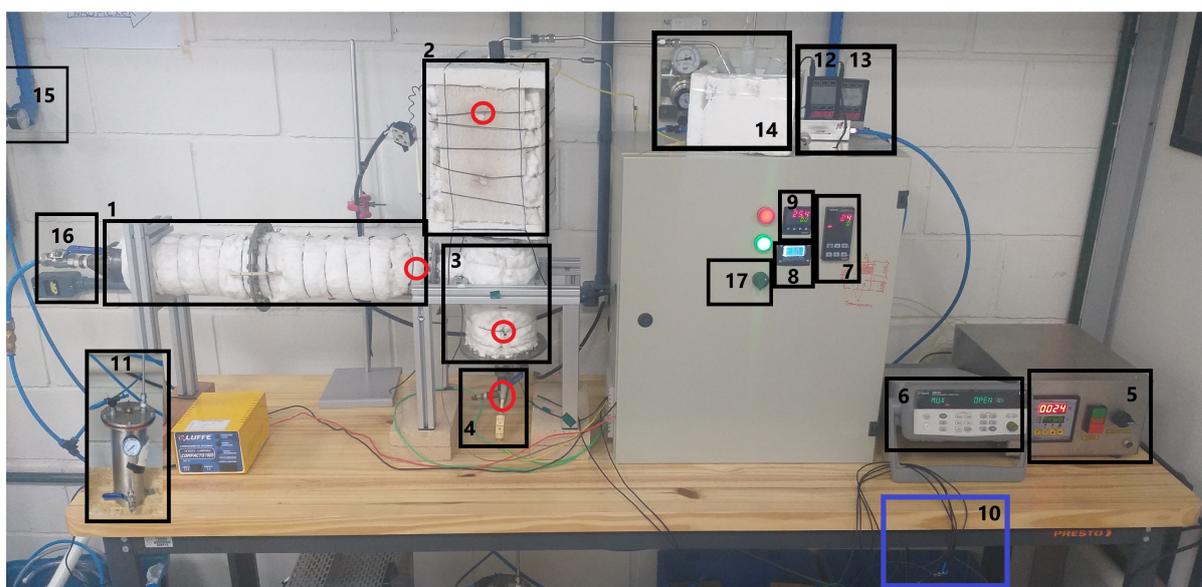
Após a pressurização do tanque ajustou-se um valor de *Duty Cycle* e de frequência na interface PWM. Neste trabalho fixou-se a frequência de 16Hz e variou-se o *Duty Cycle*. O valor de *Duty Cycle* trata-se dos ciclos de abertura do bico injetor, variando de 0 a 100%, ou seja, quanto maior o valor, maior o período em que o bico injetor estará descarregando fluido.

O procedimento de calibração consistiu em posicionar o bico injetor na boca de um béquer posicionado sobre a balança. Zera-se a balança e inicia-se a calibração, ligando o bico injetor e cronometrando o tempo. Para cada *Duty Cycle* foi realizado 3 repetições de 1 minuto. Como o *Duty Cycle* representa a proporção em que o bico injetor fica aberto, entregando combustível, então variando este valor cria-se uma tendência linear de vazão mássica da mistura água/etanol. A Figura 35 (apêndice) mostra o comportamento linear da vazão da mistura água/etanol em função da variável *Duty Cycle*. O máximo desvio padrão encontrado foi de 0,011 g/min.

3.4.2 Roteiro de operação da bancada

Abaixo são listados os procedimentos experimentais que foram utilizados para inicialização e operação da bancada experimental. A Figura 13, aliada à descrição dos passos, auxiliam no entendimento do procedimento de inicialização e operação da bancada.

Figura 13 – Identificação das partes e dos sistemas de controle da bancada.



Fonte: Autor.

1. Ligar o compressor de ar e regular a pressão no regulador (15) em 6 bar;

2. Abrir a válvula de esfera (16) para que o ar escoe no interior do sistema;
3. Configurar o controlador de vazão (13) para um valor de 17 litros por minuto;
4. Ligar a chave seletora do painel (17) e configurar o controlador de temperatura do ar (9) para 300 °C;
5. Deixar o ar escoando pelo sistema até que a temperatura do escoamento chegue em 300 °C. Esta temperatura é monitorada pelo sensor de temperatura representado pelo círculo vermelho no aquecedor de ar (1) da Figura 13;
6. Pressurizar o tanque da mistura água/etanol (11) em 3 bar com N₂;
7. Após pressurizado, verificar se há algum vazamento nas tubulações e sistema de injeção (4) dos reagentes líquidos;
8. Ligar o sistema de aquisição de temperaturas AGILENT (6);
9. Configurar o controlador de temperatura (7) da vela de pré aquecimento da mistura reagente água/etanol para 80 °C. Certificar-se de que haja líquido na tubulação do tanque até o bico injetor, após a pressurização, pois na ausência de fluido a vela pode sofrer danos;
10. Ajustar a interface do controlador PWM (8) na frequência de 16 Hz e escolher o ciclo de abertura do bico (*Duty Cycle*) a ser executado;
11. Após a temperatura do ar atingir 300 °C, ligar o controlador do aquecimento do reator (5) e configurá-lo para a temperatura de reforma escolhida (por exemplo, se a temperatura de reforma for de 500 °C, ajustar essa temperatura no controlador);
12. Acompanhar o aumento de temperatura do reator, pois dependendo da quantidade de espumas, a diferença entre a temperatura indicada no controlador e a temperatura efetiva dentro do reator pode variar, então a temperatura indicada pelo termopar dentro do reator deve ser levada em conta. O sensor que indica a temperatura no interior do reator está representado na Figura 13 pelo círculo vermelho na seção de reforma (2);
13. Assim que a temperatura de reforma atingir o programado, desligar a entrada de ar no sistema, desligar o aquecimento de ar, substituir a tubulação de ar na entrada do controlador de vazão (12) pelo gás de ativação do catalisador (95% N₂ e 5% de H₂);
14. Ajustar a vazão do gás de ativação do catalisador em 0,3 lpm e deixar escoar pelo sistema durante 30 minutos. Esse processo é necessário para a ativação do catalisador;

15. Após 30 minutos, desligar o gás de ativação, retirar da entrada do controlador e reconectar a entrada de ar comprimido;
16. Ajustar a vazão de ar comprimido em 0,8 litros por minuto e do N₂ de diluição em 16,2 litros por minuto;
17. Ligar novamente as resistências de aquecimento do ar e deixar estabilizar até a temperatura de 300 °C;
18. Após a estabilização da temperatura de reforma (termopar dentro do reator), verificar se a tubulação de saída dos gases reformados está conectada à saída do reator e se há gelo e água no sistema de resfriamento de gases (14);
19. Preparar o Cromatógrafo Gasoso para o experimento;
20. Verificar se as pressões e temperaturas estão estáveis durante 15 minutos. Após este período, o sistema está pronto para os testes de reforma;
21. Ligar o bico injetor durante 3 minutos, utilizando a chave liga/desliga bico injetor (10). Enquanto isso, acompanhar a temperatura de vaporização na região de evaporação do reator (3). Caso a temperatura esteja abaixo de 80 °C, o sistema deve ser desligado, pois há indícios de não evaporação da mistura água/etanol. O sensor que monitora esta temperatura está representado pelo círculo vermelho da seção evaporativa (3) da Figura 13;
22. Após 3 minutos, acionar a leitura no cromatógrafo gasoso;
23. Desligar o escoamento de Nitrogênio e aumentar o escoamento de ar comprimido para 17 lpm, e deixar escoando pelo sistema durante 15 minutos. Este processo é necessário para a limpeza de possíveis formações de coque sobre o catalisador;
24. Após isso, repetir todos os passos anteriores, caso seja necessário a realização de mais testes.

3.5 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Medições experimentais envolvem um valor central médio e uma faixa que quantifica a incerteza relacionada à esta medição, que está associado a um determinado nível de confiabilidade. A determinação das incertezas de parâmetros calculados indiretamente foi realizada. Esta determinação foi executada por meio do processo de propagação de incertezas experimentais, expressa pela Equação (45)

$$U_{C(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 U_{(x_i)}^2} \quad (45)$$

Onde $U_{C(y)}$ é a incerteza combinada de um resultado y , ∂f é a função do parâmetro calculado, ∂x_i é a grandeza associada a uma incerteza de medição e $U_{(x_i)}$ é a incerteza associada ao aparelho de medição, normalmente expressa pelo fabricante do aparelho.

Foram obtidas as incertezas combinadas dos parâmetros de vazão volumétrica de água (\dot{V}_{H_2O}), vazão volumétrica de oxigênio (\dot{V}_{O_2}), vazão volumétrica de etanol ($\dot{V}_{C_2H_5OH}$), número de Reynolds (Re_D) nas seções de aquecimento do ar e evaporador, bem como o número de Reynolds específico da superfície da espuma (Re_s).

Para os cálculos das medições de vazões dos combustíveis líquidos, foi considerado o maior desvio padrão encontrado durante a calibração do bico injetor pelo método gravimétrico. Já no cálculo da vazão do escoamento gasoso, a incerteza de medição do aparelho controlador de vazão foi considerada. Para medições envolvendo dimensões do reator, a incerteza de medição do paquímetro foi utilizada. Para os cálculos envolvendo parâmetros dependentes de temperatura, a incerteza de medição dos sensores de temperatura foi utilizada. A Tabela 5 traz os valores de incertezas de medição associadas aos aparelhos utilizados.

Tabela 5 – Incertezas de medição dos aparelhos utilizados, associado ao respectivo parâmetro.

Parâmetro	Incerteza de medição
\dot{m}_{H_2O}	$\pm 0,011 [g/min]$
$\dot{m}_{C_2H_5OH}$	$\pm 0,011 [g/min]$
Diâmetros	$\pm 0,001 [m]$
\dot{V}_{O_2}	$\pm 0,17 [l/min]$
Temperatura	$\pm 5,0 [^\circ C]$

Fonte: Autor.

A incerteza combinada para a vazão volumétrica de água na entrada do reator (\dot{V}_{H_2O}), vazão volumétrica de oxigênio na entrada do reator (\dot{V}_{O_2}), vazão volumétrica de etanol na entrada do reator ($\dot{V}_{C_2H_5OH}$), número de Reynolds para os escoamentos das seções de aquecimento do ar e evaporador (Re_D) e para o número de Reynolds específico do escoamento sobre a superfície porosa da espuma (Re_s), são dados pela Equação (46), Equação (47), Equação (48), Equação (49) e Equação (50), respectivamente.

$$U_{\dot{V}_{H_2O}} = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{V}_{H_2O}}{\partial \dot{m}_{H_2O}} U_{\dot{m}_{H_2O}} \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_{H_2O}}{\partial \rho_{H_2O}} U_{\rho_{H_2O}} \right]^2} \quad (46)$$

$$U_{\dot{V}_{O_2}} = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{V}_{O_2}}{\partial \dot{m}_{O_2}} U_{\dot{m}_{O_2}} \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_{O_2}}{\partial \rho_{O_2}} U_{\rho_{O_2}} \right]^2} \quad (47)$$

$$U_{\dot{V}_{C_2H_5OH}} = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{V}_{C_2H_5OH}}{\partial \dot{m}_{C_2H_5OH}} U_{\dot{m}_{C_2H_5OH}} \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_{C_2H_5OH}}{\partial \rho_{C_2H_5OH}} U_{\rho_{C_2H_5OH}} \right]^2} \quad (48)$$

$$U_{Re_D} = \sqrt{\left[\frac{\partial Re_D}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}} \right]^2 + \left[\frac{\partial Re_D}{\partial D_{int}} U_{D_{int}} \right]^2 + \left[\frac{\partial Re_D}{\partial \mu} U_{\mu} \right]^2} \quad (49)$$

$$U_{Re_s} = \sqrt{\left[\frac{\partial Re_s}{\partial \dot{m}_{mix}} U_{\dot{m}_{mix}} \right]^2 + \left[\frac{\partial Re_s}{\partial \mu_{mix}} U_{\mu_{mix}} \right]^2 + \left[\frac{\partial Re_s}{\partial S_v} U_{S_v} \right]^2 + \left[\frac{\partial Re_s}{\partial A_{tr}} U_{A_{tr}} \right]^2} \quad (50)$$

Os valores obtidos para as incertezas combinadas dos parâmetros acima mencionados, levam em consideração a vazão fixa de operação da bancada, de 0,03 ml/s da mistura água/etanol em uma razão molar de 1,5:1; vazão de ar em 17 l/min (0,2 l/min de O₂ e 16,8 l/min de N₂ de diluição). A adoção de uma vazão fixa para a operação da bancada será melhor discutida no Capítulo 4. A Tabela 6 traz os resultados das análises de incerteza combinada para os parâmetros analisados no presente experimento.

Tabela 6 – Incertezas combinadas e erros associados.

Parâmetro Avaliado	Valor Mensurado	Temperatura Média	$U_{c(y)}$	Erro Associado
\dot{V}_{H_2O}	$1,00 \times 10^{-8}$ [m ³ /s]	25°C	$\pm 1,21 \times 10^{-10}$ [m ³ /s]	1,23 %
\dot{V}_{O_2}	$2,83 \times 10^{-6}$ [m ³ /s]	25°C	$\pm 2,06 \times 10^{-7}$ [m ³ /s]	7,28 %
$\dot{V}_{C_2H_5OH}$	$2,00 \times 10^{-8}$ [m ³ /s]	25°C	$\pm 5,44 \times 10^{-10}$ [m ³ /s]	2,73 %
Re_D (aquecedor de ar)	157 [-]	162,5°C	$\pm 19,51$ [-]	12,43 %
Re_D (evaporador)	188 [-]	115°C	$\pm 15,62$ [-]	8,31 %
Re_s	0,16 [-]	600°C	$\pm 0,042$ [-]	26,25 %

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, como análise térmica do sistema, a análise de equilíbrio químico da reforma auto térmica do etanol, necessária para se ter informações da quantidade de H_2 produzido e então calcular as vazões necessárias para alimentação do reator, vazões dos reagentes, testes de aquecimento, evaporação dos reagentes, testes catalíticos e testes de branco.

4.1 ANÁLISE TÉRMICA E HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos decorrentes da análise térmica e hidrodinâmica do escoamento ao longo de todo o sistema, trazendo informações como coeficiente convectivo, perdas de calor para o ambiente, isolamento térmica, número de Reynolds, número de Rayleigh e o número de Nusselt do escoamento.

4.1.1 Seção de aquecimento do ar

A seção de aquecimento do ar foi desenvolvida para que resistências elétricas pudessem ser alojadas em seu interior, com a finalidade de aquecer o escoamento de ar para posterior evaporação dos reagentes líquidos. A potência necessária para a evaporação da mistura, foi calculada baseando-se no modelo apresentado pela Equação (7) e Equação (8), do Capítulo 3. Os cálculos foram desenvolvidos considerando a maior vazão da mistura, sendo de 2,00 mL/s de água e 1,86 mL/s de etanol.

A entalpia de vaporização da água e do etanol, à uma pressão de 1 atm é de 2257 kJ/kg e 838,3 kJ/kg, e os calores específicos da água e do etanol são 4,22 kJ/kg.K e 2,46 kJ/kg.K, respectivamente. Assim chega-se a uma potência requerida para vaporização da mistura água e etanol de 6,30 kW.

Tendo em vista a potência requerida para a vaporização da mistura, foram utilizadas duas resistências do tipo cruzeta para realizar o aquecimento do ar, com 3 kW de potência cada uma, totalizando uma potência instalada no sistema aquecedor de ar de 6 kW. Para auxiliar na evaporação da mistura, uma vela de aquecimento automotiva foi utilizada para pré aquecer a mistura a 80 °C. Paralelamente, a mistura é pressurizada a 3 bar, para obter uma evaporação flash da mistura ao adentrar à câmara de evaporação.

Foram avaliadas as propriedades térmicas e hidrodinâmicas do escoamento interno durante o aquecimento do ar no experimento, e a Tabela 7 traz os valores calculados.

Todas as características do escoamento interno do aquecedor de ar, apresentadas na Tabela 7, foram avaliadas a temperatura média do fluido, ou seja, a metade da soma da temperatura de entrada e saída do ar, chegando em uma temperatura média

Tabela 7 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento interno da seção de aquecimento do ar.

$L_{h,laminar}$ [m]	$L_{t,laminar}$ [m]	Re_D [-]	Nu [-]	h_{int} [W/m ² .K]
0,596	0,418	157	4,50	2,08

Fonte: Autor.

de 162,5°C. A vazão de entrada de ar no sistema foi fixada em 17 lpm, devido à limitações técnicas do laboratório, como perdas de carga nas tubulações de ar comprimido e pela própria capacidade do compressor de ar.

Tendo conhecimento da vazão de ar e propriedades do mesmo, foi avaliado o número de Reynolds (Re_D) do escoamento. O Re_D nos traz a relação das forças inerciais sobre as forças viscosas do escoamento. Diante do resultado obtido, pode-se verificar a grande influência da temperatura sobre o fluido, fazendo com que as forças viscosas predominem. Somado à baixa vazão de ar, suas características inerciais apresentam valores baixos. Assim o número de Reynolds caracteriza um escoamento em regime laminar.

Levando em conta o número de Reynolds, chega-se aos valores de comprimento de entrada térmica ($L_{t,laminar}$) e hidrodinâmica ($L_{h,laminar}$) do escoamento de ar no sistema aquecedor. Pode-se verificar, que o escoamento de ar está em desenvolvimento hidrodinamicamente no tubo. E termicamente, se desenvolve na região final do tubo. Levando em conta que o comprimento do tubo do sistema de aquecimento de ar é de 504 mm, todos os cálculos para análise das características do escoamento interno foram considerados como escoamento em desenvolvimento.

O número de Nusselt (Nu) nos apresenta uma grandeza adimensional que relaciona o número de Reynolds com as características geométricas do tubo, e nos fornece uma relação entre a capacidade do fluido em transferir calor por convecção sobre sua capacidade condutiva de transferir calor. Quanto maior o Nu , maior será a capacidade de um fluido transferir calor por convecção. Diante do valor obtido para o número de Nu , pode-se concluir uma certa dificuldade na transferência de calor por convecção do ar, e isso está relacionado ao baixo número de Re_D decorrente da baixa vazão do escoamento.

Com os valores obtidos de Re_D e Nu , calcula-se o coeficiente convectivo de transferência de calor interno do escoamento de ar. O coeficiente convectivo, nos mostra fisicamente a capacidade de um fluido transferir calor em função da sua temperatura e geometria do escoamento. O valor do coeficiente convectivo interno do escoamento de ar, obtido no experimento, apresentado na Tabela 7, nos mostra a dificuldade de transferência de calor em um escoamento de ar com valores de Re_D baixos, e temperaturas elevadas.

O sistema de aquecimento do ar, sofre um escoamento externo sobre a superfí-

cie do isolante, devido à diferença de temperatura da sala e a temperatura de superfície externa do isolante térmico, com isso uma convecção natural sobre a superfície do isolante ocorre. A Tabela 8 mostra os valores calculados para o escoamento externo. A temperatura da sala durante os experimentos permaneceu em 20 °C, e a temperatura média da superfície do isolante térmico foi medida em 65 °C, com aquecimento interno do ar à 300 °C.

Tabela 8 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção de aquecimento do ar.

Ra_L [-]	Nu [-]	h_{ext} [W/m ² .K]
$7,19 \times 10^6$	25,72	5,19

Fonte: Autor.

Todas as propriedades do ar para os cálculos do escoamento externo, foram avaliadas em temperatura média de filme, ou seja, a metade da soma entre a temperatura da sala com a temperatura da superfície do isolante térmico. O número de Rayleigh (Ra_L) nos mostra a razão entre as forças de flutuação e o produto entre as difusividades térmicas e de quantidade de movimento do fluido em torno de um cilindro horizontal aquecido com superfície isotérmica.

Diante dos resultados das características do escoamento interno e externo, pode-se calcular as perdas de energia térmica para o ambiente, para a seção de aquecimento do ar. A Tabela 9 mostra as perdas de energia para o ambiente pela combinação de condução e convecção, representada por $\dot{Q}_{perda,comb}$, e por radiação, representada por $\dot{Q}_{perda,rad}$.

Tabela 9 – Perdas de energia térmica do sistema aquecedor de ar.

Característica	T_s [°C]	$\dot{Q}_{perda,comb}$ [W]	$\dot{Q}_{perda,rad}$ [W]
Com isolamento térmico	65	95	59
Sem isolamento térmico	178	171	220

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Tabela 9 trazem as perdas de energia térmica considerando o sistema aquecedor de ar com e sem isolante térmico. Todas as propriedades foram avaliadas em temperatura média de filme. O isolante térmico utilizado foi a manta de fibra de cerâmica, com espessura de 25 mm e condutividade térmica de 0,05 W/m.K, fornecida pela empresa OBR Isolantes. A emissividade do isolante foi de 0,5 (CENGEL; GHAJAR, 2009). Todas as propriedades foram consideradas constantes, inclusive as condutividades térmicas do ar e da manta isolante. A temperatura média do ambiente é de 20 °C, que é a temperatura média do laboratório utilizando o condi-

cionador de ar. As temperaturas de superfície foram medidas utilizando o termômetro infravermelho da marca Omega, modelo OS423-LS, com incerteza de 0,1 %.

Observou-se uma redução de perdas de energia térmica para o ambiente de aproximadamente 60%, com a aplicação do isolante de fibra cerâmica. A utilização de um isolante térmico com maior espessura não foi analisada, devido a motivos técnicos como ligação elétrica das resistências de aquecimento do ar e posicionamento dos sensores de temperatura.

4.1.2 Seção de evaporação

A seção de evaporação dos reagentes líquidos foi construída para que o escoamento de ar aquecido entrasse em contra corrente com a atomização dos fluidos líquidos gerada pelo bico injetor, conforme já apresentado no Capítulo 3. Nesta seção, o escoamento é formado por ar, etanol vaporizado e vapor d'água.

Para a análise das características do escoamento interno da seção evaporativa algumas simplificações foram impostas, tais como, o escoamento ocorre somente na fase gasosa, as propriedades dos fluidos foram avaliadas em temperatura média de escoamento, e como propriedades parciais para a mistura com suas devidas proporções, as propriedades dos fluidos foram consideradas constantes ao longo da região de escoamento.

A Tabela 10 mostra os valores calculados para o escoamento interno do evaporador. A temperatura média desse escoamento foi de 115 °C, considerando que a região onde ocorre a evaporação tem temperatura média de 140 °C e ao final da seção evaporativa o fluido se encontra com temperatura média de 90 °C.

Tabela 10 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento interno da seção evaporativa.

$L_{h,laminar}$ [m]	$L_{t,laminar}$ [m]	Re_D [-]	Nu [-]	h_{int} [W/m ² .K]
0,753	0,534	188	6,51	2,56

Fonte: Autor.

Para o escoamento da seção evaporativa observa-se um leve incremento no número de Reynolds (Re_D) do escoamento quando comparado ao escoamento da seção de aquecimento do ar. Isso se dá pelo fato de nesta região, além da vazão de ar, temos a adição do escoamento dos reagentes água e etanol, atomizados por meio de um bico injetor, promovendo assim um aumento na vazão mássica do escoamento e conseqüentemente um aumento no número de Reynolds. Ainda, diante deste valor de Re_D , o escoamento permanece na fase laminar na seção de evaporação.

Tendo em vista que o escoamento nesta região é laminar, podemos determinar os comprimentos de entrada térmico ($L_{t,laminar}$) e hidrodinâmico ($L_{h,laminar}$) do escoamento. De acordo com os resultados de $L_{h,laminar}$ e $L_{t,laminar}$, pode-se concluir que

o escoamento encontra-se em desenvolvimento tanto termicamente quanto hidrodinamicamente, considerando que o comprimento da seção de evaporação é de 250 mm. Desta forma, os cálculos para determinação do número de Nusselt (Nu) e coeficiente de convecção interna (h_{int}), foram realizados com correlações para escoamentos laminares em desenvolvimento na região de entrada.

Na região de evaporação, percebe-se um leve aumento no número de Nusselt (Nu), quando comparado ao Nu da seção de aquecimento do ar, ou seja, 6,51 (evaporação) contra 4,50 (aquecimento do ar). Isso se dá pelo fato do número de Nusselt, para escoamentos internos laminares em desenvolvimento, estar intimamente ligado ao número de Reynolds. Percebe-se que, tanto para a região de aquecimento como para a região de evaporação o valor de Nusselt se aproxima assintoticamente para 3,66, que é o valor para Nusselt em escoamentos laminares completamente desenvolvidos, com temperatura constante na superfície (CENGEL; GHAJAR, 2009).

Já o coeficiente convectivo (h_{int}) do escoamento interno da seção evaporativa tem um leve incremento, comparado ao sistema aquecedor de ar, ou seja, aumento de 2,08 W/m².K para 2,56 W/m².K, o que representa um aumento de aproximadamente 22%. O aumento no coeficiente de convecção interna (h_{int}) está relacionado ao aumento do número de Nusselt (Nu). Mesmo que o coeficiente convectivo tenha aumentado, ainda é um valor baixo, mostrando a dificuldade na transferência de calor em escoamentos laminares, com número de Reynolds na ordem de 10².

Assim como o sistema de aquecimento do ar, a seção evaporativa também é submetida a um escoamento externo sobre a superfície do isolante, devido à diferença de temperatura da sala e a temperatura de superfície externa do isolante térmico, com isso uma convecção natural sobre a superfície do isolante ocorre. A Tabela 11 mostra os valores calculados para o escoamento externo. A temperatura da sala durante os experimentos permaneceu em 20 °C, e a temperatura média da superfície do isolante térmico na seção evaporativa foi medida em 35 °C.

Tabela 11 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção evaporativa.

Ra_L [-]	Nu [-]	h_{ext} [W/m ² .K]
$2,20 \times 10^6$	20,51	4,05

Fonte: Autor.

Os valores calculados e apresentados na Tabela 11 foram avaliados com propriedades em temperatura média de filme, e consideradas constantes ao longo do escoamento. Esta análise mostra uma redução no número de Ra_L , Nu e h_{ext} , quando comparados aos valores do escoamento externo da seção de aquecimento de ar. Isso é explicado pelo fato da temperatura média interna da seção evaporativa ser menor, em decorrência da necessidade de evaporação dos reagentes líquidos pelo ar aque-

cido. E, conseqüentemente, a temperatura da superfície externa do isolante térmico na seção evaporativa é aproximadamente a metade da temperatura da superfície externa do isolante na superfície do aquecedor de ar, ou seja, 65°C contra 35°C. De qualquer maneira, os valores dos coeficientes de convecção externa da seção evaporativa e de aquecimento de ar estão na faixa dos valores típicos encontrados para escoamentos de convecção natural externa, que é de 5 W/m².K (BERGMAN *et al.*, 2011).

As perdas de energia térmica para o ambiente da seção evaporativa foram avaliadas, e a Tabela 12 traz os resultados obtidos.

Tabela 12 – Perdas de energia térmica da seção evaporativa.

Característica	T_s [°C]	$\dot{Q}_{perda,comb}$ [W]	$\dot{Q}_{perda,rad}$ [W]
Com isolamento térmico	35	4	6
Sem isolamento térmico	95	30	32

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados para perdas de energia térmica no evaporador foram avaliados com propriedades constantes e obtidas a temperatura média de filme. A temperatura da sala foi mantida em 20°C durante os experimentos, e a temperatura média da superfície com e sem isolamento foram de 35°C e 95°C, respectivamente. O sistema de isolamento térmico de fibra de cerâmica na seção evaporativa, possui 25 mm de espessura, condutividade térmica de 0,05 W/m².K, e densidade de 160 kg/m³, fornecido pela empresa OBR Isolantes. Sua emissividade foi inferida em 0,5 (CENGEL; GHAJAR, 2009). A adoção do sistema de isolamento térmico, garantiu uma redução nas perdas de energia térmica para o ambiente de aproximadamente 80%, quando comparado ao sistema sem isolamento. Espessuras adicionais de isolamento térmico não foram avaliadas devido à dificuldades técnicas de intervenção aos sensores de temperatura e manutenção do sistema.

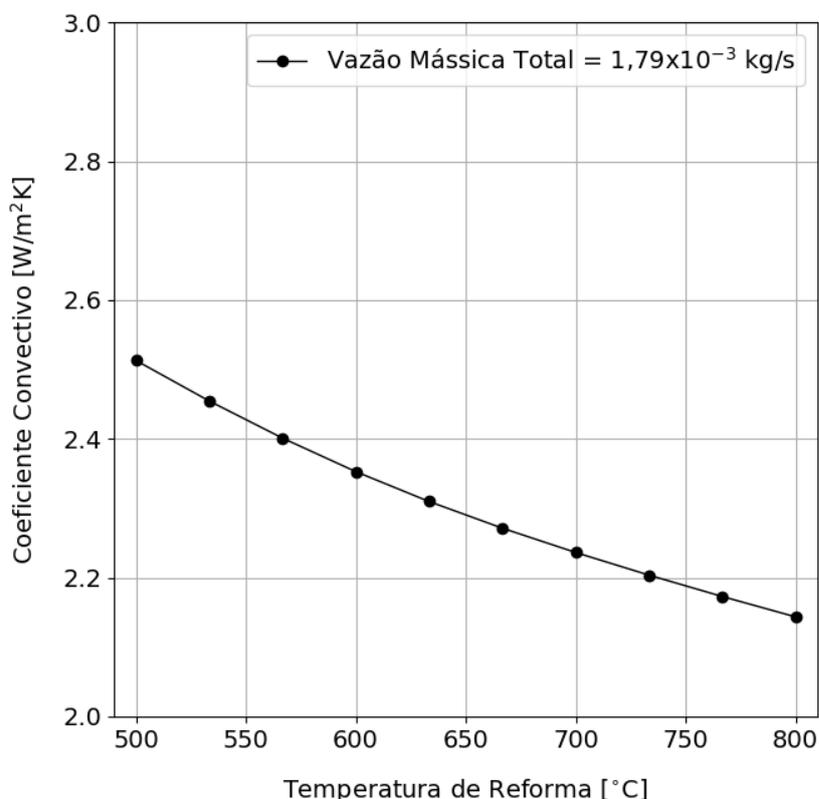
4.1.3 Seção do reator

A seção denominada de reator é o local onde a reforma auto térmica do etanol ocorre, e nesta região são necessárias elevadas temperaturas. No presente trabalho, as temperaturas utilizadas para a reforma foram de 500°C, 600°C e 700°C. Para a determinação da potência necessária para atingir tais temperaturas, foi necessária a implementação do modelo proposto por Peng e Richardson (2004), apresentado no Capítulo 3. O modelo, avalia as características térmicas e hidrodinâmicas de um escoamento através de uma espuma cerâmica porosa.

A Figura 14 mostra a variação do coeficiente convectivo em função da temperatura de reforma. A coeficiente convectivo apresentado é função do número de Reynolds específico da espuma, ou seja, do escoamento que ocorre entre os poros da espuma

cerâmica. A vazão mássica utilizada para a determinação do número de Reynolds foi a vazão total de todos os elementos da reforma, ou seja, etanol, água, oxigênio e nitrogênio. Para a aplicação do modelo, foram consideradas 4 espumas na região de reforma, pois dependendo da quantidade de espumas, altera substancialmente a área da sua superfície, sendo esta região onde ocorrem os maiores gradientes de temperatura.

Figura 14 – Coeficiente convectivo no escoamento sobre as espumas porosas no reator em função da temperatura de reforma.



Fonte: Autor.

Nota-se a grande influência da viscosidade da mistura nos valores do coeficiente convectivo. Os efeitos viscosos da mistura, em temperaturas elevadas, predominam sobre os efeitos inerciais, fazendo com que ocorra uma diminuição no número de Reynolds do escoamento específico no interior da espuma. Outra característica desse escoamento, é a grande resistência ao deslocamento do fluido, devido aos poros da espuma, aliado à grande área de superfície para a geração de tensões de cisalhamento nas paredes. Todos esses fatores, somados à baixa vazão de escoamento para a realização dos testes, contribuem para os baixos valores de coeficiente convectivo interno no escoamento pelo meio poroso.

Com a determinação do coeficiente convectivo do escoamento pelo meio poroso,

foi possível o cálculo da potência necessária para aquecimento da seção do reator até a maior temperatura de reforma (700 °C). A potência de aquecimento foi determinada para o pior cenário, ou seja, com o menor valor de coeficiente convectivo, que, neste caso, corresponde a maior temperatura de reforma, e conseqüentemente, necessita de maiores potências para o aquecimento. A Tabela 13 mostra as características do sistema de aquecimento desenvolvido para o aquecimento da seção de reforma.

Tabela 13 – Características do sistema de aquecimento da seção do reator.

Característica	Diâmetro do fio [mm]	Resistência [Ohm/m]	Potência nominal [kW]
Fio de Khantal A1, composição: 22% cromo, 5,5% alumínio, 0,5% cobre e ferro (restante)	2,052	0,4384	3,5

Fonte: Autor.

O sistema de aquecimento desenvolvido para o reator, foi confeccionado internamente no laboratório, com o fio de Khantal fornecido pela empresa Supersteel. O comprimento total utilizado do fio, para a construção da resistência, foi de aproximadamente 32 metros, atingindo uma potência de 3,5 kW. As espiras formadas para a resistência foram alocadas em canais realizados no próprio isolante térmico do sistema. As placas isolantes possuem densidade de 320 kg/m³, característica que facilitou o alojamento das espiras da resistência em canais realizados nas placas. O sistema de aquecimento formou uma caixa retangular com faces de placas isolantes, com as espiras de resistências alojadas em seus canais internos, e envolvendo o reator. Todas as suas faces laterais foram fechadas, minimizando as perdas de calor para o ambiente. Uma abertura circular na face superior do sistema de aquecimento foi necessária, para que os gases reformados pudessem ser coletados do reator e transportados até o trocador de calor para resfriamento. Um melhor entendimento do sistema de aquecimento pode ser obtido com a visualização da Figura 26 (apêndice).

De forma análoga às seções de aquecimento do ar e de evaporação, o sistema de aquecimento do reator também é submetido a uma perda de energia térmica, devido ao escoamento externo de convecção natural, causada pela diferença de temperatura entre o ar ambiente da sala e a temperatura da superfície externa do isolante térmico do sistema de aquecimento do reator. A Tabela 14 traz os valores obtidos para o escoamento externo de convecção natural sobre as paredes do sistema de aquecimento do reator. A temperatura da sala e da superfície externa do sistema de isolamento do aquecedor foram medidas em 20 °C e 120 °C, respectivamente. A temperatura da superfície externa do sistema de aquecimento do reator foi obtida enquanto a temperatura interna (temperatura de reforma) era de 700 °C, sendo a temperatura de trabalho mais elevada que o sistema opera. Sendo assim, a maior perda de energia ocorre nesta temperatura, logo, este foi o motivo para a escolha da análise nestas condições.

Tabela 14 – Características térmicas e hidrodinâmicas do escoamento externo da seção do reator.

Ra_L [-]	Nu [-]	h_{ext} [W/m ² .K]
$1,26 \times 10^8$	65,62	6,79

Fonte: Autor.

Todas as análises do escoamento externo foram feitas com base na temperatura média de filme e as propriedades do ar constantes. Nota-se um incremento em duas ordens de grandeza no valor de Rayleigh (Ra_L), três vezes no valor de Nusselt (Nu) e 50% no valor do coeficiente de convecção externa (h_{ext}), o que pode ser explicado pelo aumento da temperatura na superfície externa do sistema do reator quando comparado ao sistema evaporativo.

Com as análises dos números de Ra_L , Nu e h_{ext} , para o escoamento externo sobre a seção do reator, calcula-se a perda de energia térmica por convecção natural do sistema para o ambiente. A Tabela 15 traz os valores obtidos para as perdas de energia térmica para o ambiente na combinação dos mecanismos de convecção, condução e radiação.

Tabela 15 – Perdas de energia térmica da seção do reator.

Característica	T_s [°C]	$\dot{Q}_{perda,comb}$ [W]	$\dot{Q}_{perda,rad}$ [W]
Com isolamento térmico	120	314	96

Fonte: Autor.

Nota-se um aumento nas perdas de energia térmica para o ambiente na seção do reator, quando comparadas às perdas nos sistemas de evaporação e aquecimento de ar. Isso se dá pelo fato de que a região de reforma é a região onde ocorrem as maiores temperaturas, ou seja, as temperaturas de reforma do combustível, nesse sentido é esperado uma maior perda de energia para o ambiente neste sistema. As perdas para o ambiente pela combinação da condução e convecção, neste caso, é maior do que as perdas por radiação, isso é explicado pelo fato da condutividade térmica das placas isolantes terem um valor maior em temperaturas elevadas (0,09 W/m.K à 700°C).

A isolamento térmica utilizada no sistema do reator foram placas de fibra cerâmica, com espessura de 25 mm, condutividade térmica de 0,09 W/m.K e densidade de 320 kg/m³, fornecidas pela empresa OBR isolantes. A emissividade do isolante foi inferida em 0,5 (CENGEL; GHAJAR, 2009).

A análise das perdas de energia térmica para o ambiente, do sistema do reator sem o isolamento térmico, não foram realizadas devido ao fato de que as próprias placas de isolamento servem como suportes das espiras de resistências, sendo assim,

somente a análise das perdas de energia térmica para o ambiente do sistema do reator com a isolação, foi considerada.

4.2 VAZÕES DE REAGENTES E POTÊNCIA NOMINAL

Nesta seção apresenta-se uma análise do equilíbrio químico da reforma auto térmica do etanol. O objetivo desta análise é obter uma estimativa coerente da fração molar de H_2 nos produtos em diferentes temperaturas. Tal estimativa será utilizada no cálculo das vazões que devem ser testadas na bancada experimental conforme metodologia descrita no Capítulo 3.

4.2.1 Análise do equilíbrio químico

A composição de equilíbrio químico foi obtida a biblioteca de código aberto Cantera em linguagem Python. O código utilizado foi desenvolvido pelo autor e utiliza o método da minimização da energia livre de Gibbs para a análise (FRANZELLI; ROCCHI; WOLF, s.d.). Foram considerados como reagentes apenas o etanol, água e ar, em diferentes proporções. Já nos produtos foram considerados as seguintes espécies: etanol, água, monóxido de carbono, dióxido de carbono, etileno, metano, acetaldeído e hidrogênio (C_2H_5OH , H_2O , CO , CO_2 , C_2H_4 , CH_4 , CH_3CHO e H_2). As propriedades termodinâmicas utilizadas são aquelas descritas no mecanismo de Marinov (MARINOV, 1999).

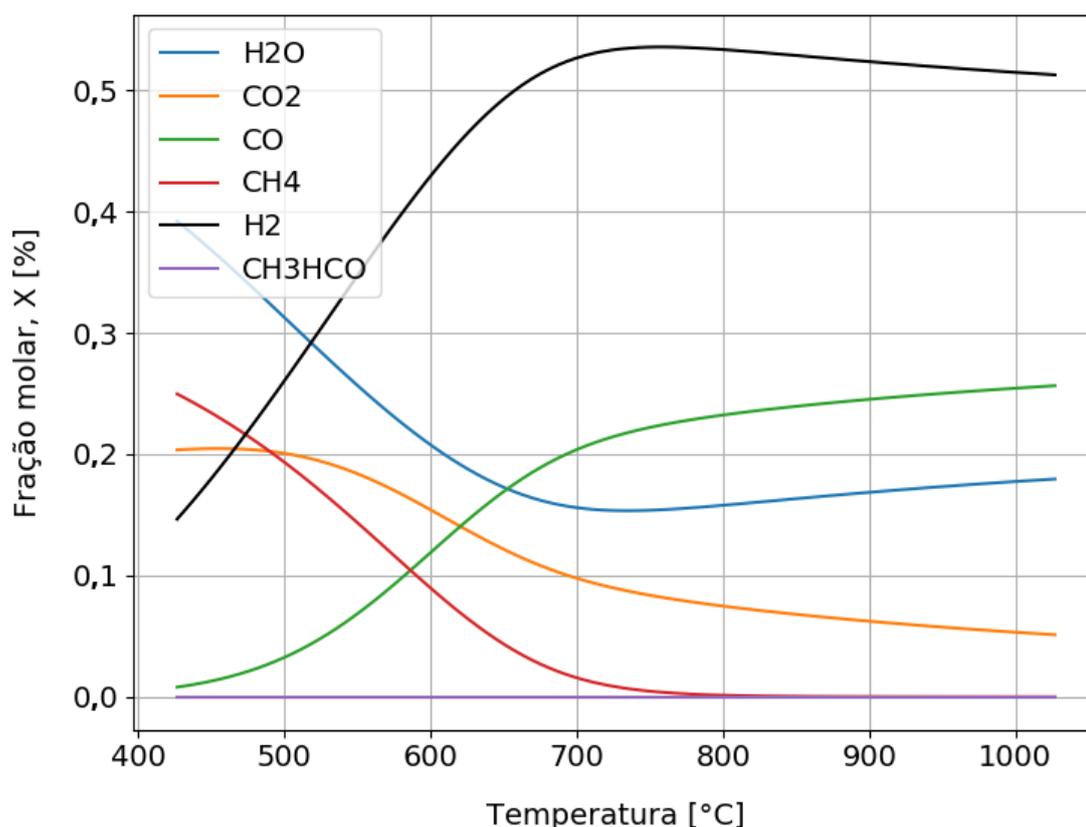
Como a reforma auto térmica (ATR) é uma combinação da reforma a vapor (SR) e da reforma de oxidação parcial (POX), e sabendo que a SR tem caráter totalmente endotérmico e a POX possui caráter exotérmico, é importante que na ATR seja feito um balanço para que a energia do processo se torne neutra, ou o mais próximo de zero, evitando assim fornecimento de energia para a reforma. Desta forma é coerente considerar que a análise de equilíbrio químico seja realizada considerando pressão e temperaturas constantes.

Tippawan e Arpornwichanop (2014) fizeram uma análise termodinâmica da ATR do etanol, e concluíram que a operação ótima do reformador está na temperatura de 1000 K, uma razão S/E = 1,5 e uma razão O/E = 0,5. Com estes parâmetros a SOFC opera com uma eficiência em torno de 60%. Portanto, a temperatura citada serve como base para os cálculos das vazões de alimentação do reator, e sendo assim, define-se como ponto de partida o equilíbrio químico da reforma auto térmica do etanol em razões estequiométricas de S/E 1,5:1 e O/E 0,5:1, para posteriormente o cálculo das vazões de alimentação do reator.

A Figura 15 mostra os resultados como frações molares dos produtos do equilíbrio químico da ATR do etanol. A maior fração de H_2 ocorre próximo da temperatura de 1000 K, mostrando boa relação com os pontos ótimos de operação citados acima.

Pode-se perceber também que acima da temperatura de 1000 K a fração de Metano (CH_4) é muito próxima de zero, o que é bom para a operação da SOFC. Por outro lado a fração de Monóxido de Carbono (CO) aumenta em temperaturas de reforma acima de 1000 K.

Figura 15 – Fração molar de equilíbrio da reforma auto térmica do etanol sob diferentes temperaturas, com razões S/E = 1,5:1 e O/E = 0,5:1, e pressão de 1 atm.

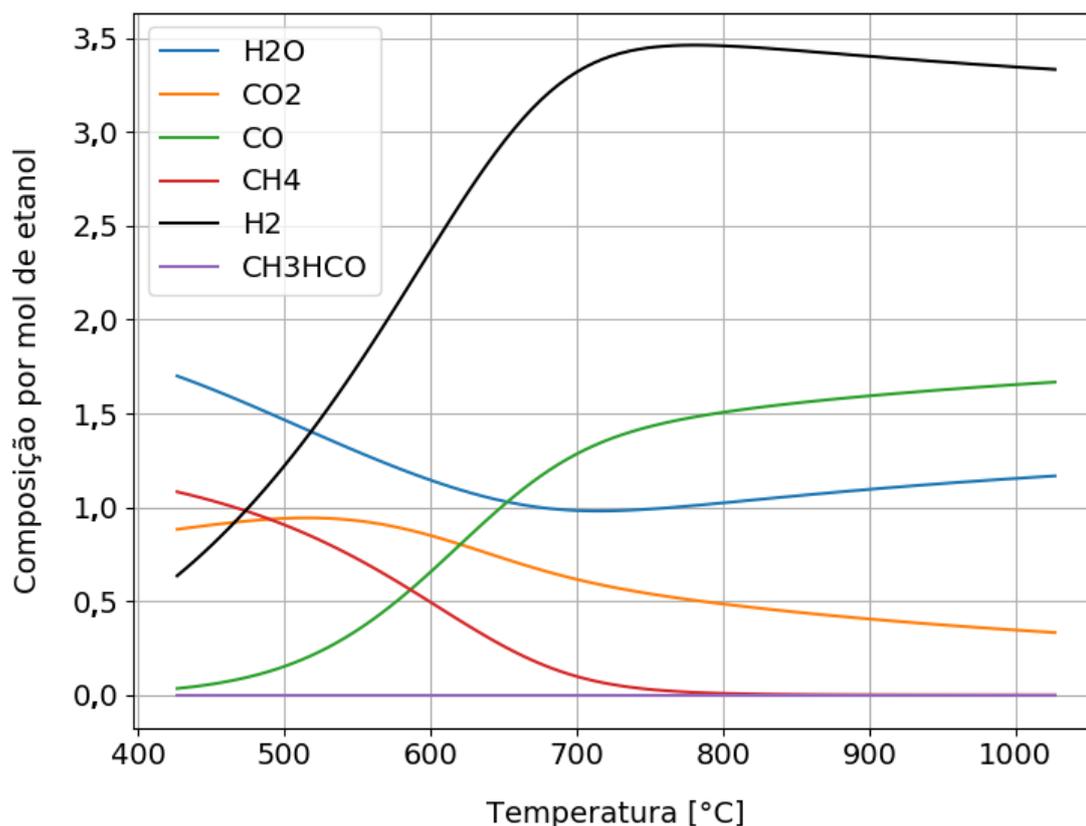


Fonte: Autor.

A relação molar entre H_2 produzido e etanol consumido é um parâmetro necessário para o cálculo das vazões da alimentação de reagentes no reator conforme descrito no Capítulo 3. Devido à SOFC utilizar $\text{H}_2 + \text{O}_2$ para converter em energia elétrica, para potencia constante da célula, quanto maior for a produção de H_2 , menor será a vazão necessário de etanol na entrada do reator para a reação. Conforme indicado na figura 16, o rendimento máximo de H_2 é obtido em temperaturas de reformas próximas de 1000K, ou seja, aproximadamente 725°C, e sua produção aumenta significativamente em temperatura acima de 700K. Em temperaturas superiores a 1000 K, o CH_4 obtido é próximo de zero, porém o CO aumenta nessas temperaturas, devido à presença da reação de reforma a vapor de metano, obtendo CO e H_2 . Devido à esses

fatores os cálculos de vazões são baseados entre as temperaturas de 500 °C a 700 °C, para este trabalho.

Figura 16 – Composição dos produtos por mol de etanol na alimentação em uma reforma auto térmica, com razões S/E = 1,5 e O/E = 0,5, e pressão de 1 atm.



Fonte: Autor.

4.2.2 Vazões de alimentação de reagentes

Nesta subseção, os resultados dos cálculos das vazões dos reagentes necessários para a reforma auto térmica do etanol são apresentadas, considerando diferentes potências nominais de uma célula a combustível e diferentes temperaturas de reforma. A Tabela 16 apresenta as vazões de oxigênio, etanol e água para alimentação do reator, calculadas de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. Os valores das vazões dos reagentes correspondem a uma faixa de temperatura de reforma auto térmica, ou seja, de temperaturas em que a reforma poderá ocorrer, e razões de S/E = 1,5 e O/E = 0,5.

A Figura 17 apresenta as vazões necessárias de água, etanol e oxigênio para alimentação do reator de reforma auto térmica. Pode-se perceber a grande influência

Tabela 16 – Vazões necessárias de oxigênio (O_2), etanol (C_2H_5OH), e água (H_2O) para produção necessária de H_2 para alimentação de diferentes potências nominais estimadas, sob diferentes temperaturas de reforma, em razões S/E = 1,5 e O/E = 0,5.

Temperatura [°C]	Oxigênio [L.min ⁻¹]	Etanol [mL.s ⁻¹]	Água [mL.s ⁻¹]	Potência [kW]
500	2,56	0,20	0,18	0,5
600	1,32	0,10	0,10	0,5
700	0,94	0,07	0,07	0,5
800	0,90	0,07	0,06	0,5
900	0,92	0,07	0,07	0,5
1000	0,93	0,07	0,07	0,5
500	7,68	0,60	0,56	1,5
600	3,96	0,31	0,29	1,5
700	2,82	0,22	0,20	1,5
800	2,70	0,21	0,20	1,5
900	2,75	0,21	0,20	1,5
1000	2,79	0,22	0,20	1,5
500	25,61	2,00	1,86	5,0
600	13,20	1,03	0,96	5,0
700	9,40	0,73	0,68	5,0
800	9,02	0,70	0,65	5,0
900	9,17	0,72	0,66	5,0
1000	9,32	0,73	0,67	5,0

Fonte: Autor.

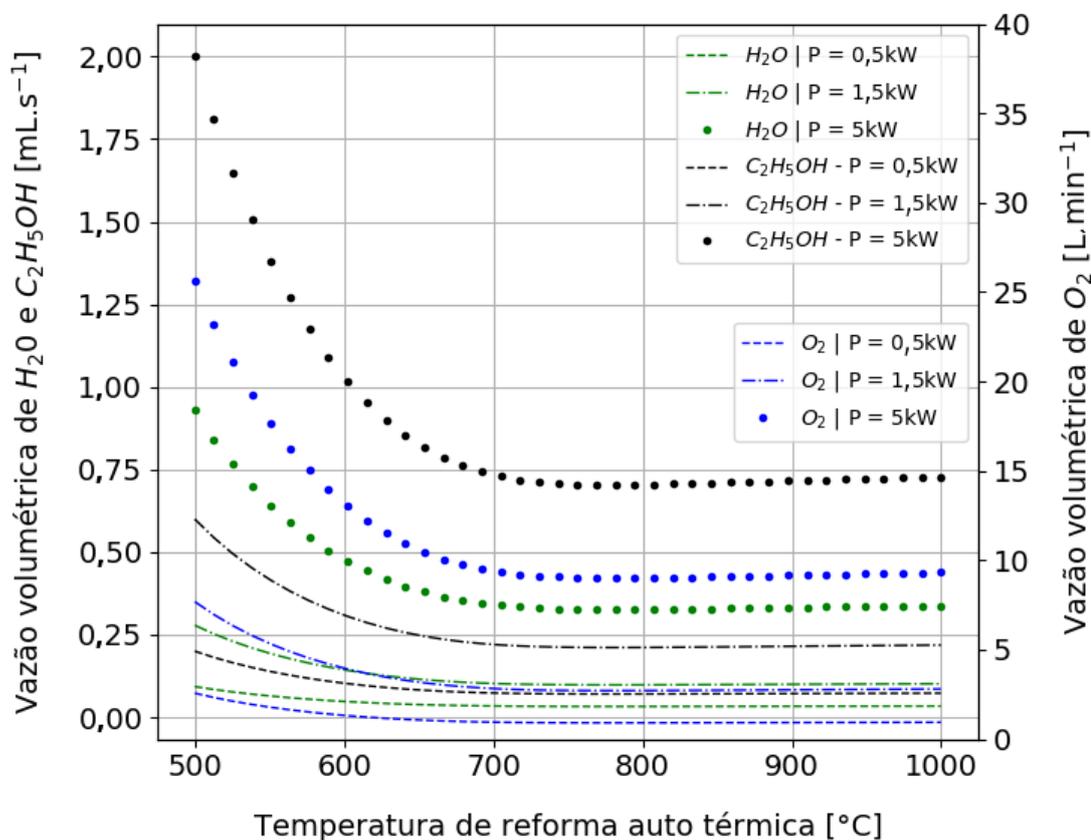
da temperatura de reforma no fluxo dos reagentes, onde, em altas temperaturas, por exemplo, em 727 °C (1000 K), as taxas de fluxo diminuem drasticamente, isso se deve à alta seletividade da reação para H_2 nesta temperatura, conforme já apresentado na Figura 16.

4.3 TESTES DE AQUECIMENTO

Foram realizados testes de aquecimento do sistema de reforma, a fim de se obter o tempo necessário para que o sistema esteja apto a inicializar a operação de reforma. Foram realizados 3 testes de aquecimento, com o objetivo de atingir da forma mais rápida possível a temperatura de reforma, que neste experimento foram de 500 °C, 600 °C e 700 °C. Os testes foram, inicialmente, realizados com escoamento de ar e após a estabilização da temperatura da região de evaporação inicia-se o escoamento da mistura água/etanol. A vazão do ar foi mantida em 17 lpm nos testes (0,2 l/min de O_2 e 16,8 l/min de N_2 para diluição). Foram obtidas duas curvas, sendo uma delas a temperatura na região de evaporação dos fluidos, e a outra a temperatura na região da reforma, ou seja, no interior do reator.

A Figura 18 mostra o tempo para o aquecimento das duas regiões, nota-se que a região de reforma leva em torno de 24 minutos para aquecer internamente até a

Figura 17 – Fluxos dos reagentes requeridos na alimentação do reator, para produção de H_2 para diferentes potências de saída.

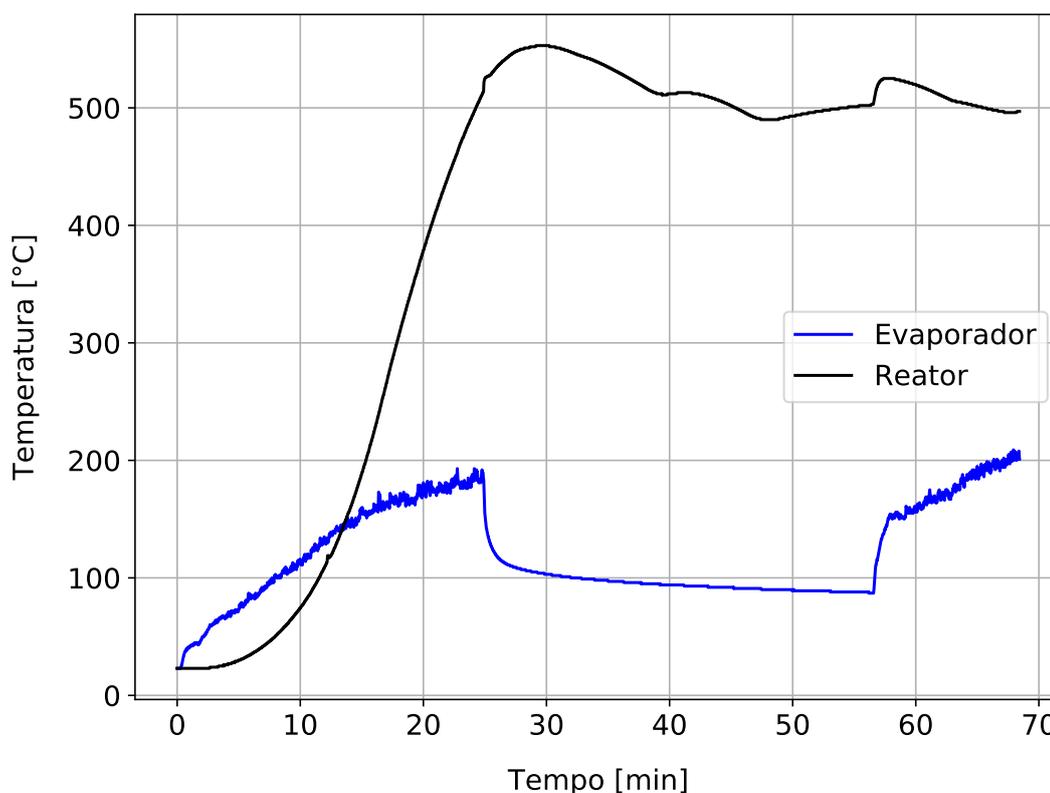


Fonte: Autor.

temperatura de 500 °C. A Figura 19 representa o tempo necessário para o aquecimento do sistema até a temperatura de 600 °C, e pode-se constatar que a temperatura é atingida decorridos aproximadamente 36 minutos. A Figura 20 representa o tempo decorrido para o sistema alcançar a temperatura de 700 °C na região de reforma, a qual é atingida no instante aproximado de 37 minutos.

O tempo decorrido para a inicialização do sistema varia entre aproximadamente 25 e 35 minutos para as três temperaturas de reforma de interesse. Quanto maior for a temperatura necessária para a reforma, maior será o tempo para o completo aquecimento do sistema. A inicialização deste tipo de sistema é um grande desafio, frente a fatores como por exemplo as espumas cerâmicas, que estão no interior da região de reforma do sistema, tanto para homogenização do escoamento, quanto para a atividade catalítica. As espumas cerâmicas feitas a base de Al_2O_3 possuem baixa condutividade térmica, o que dificulta para o rápido aquecimento do sistema. Reatores para reforma de combustíveis precisam resistir à oxidação em altas temperaturas, por esse motivo o material selecionado, acaba sendo alguma liga de INOX, e neste caso,

Figura 18 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 500 °C.



Fonte: Autor.

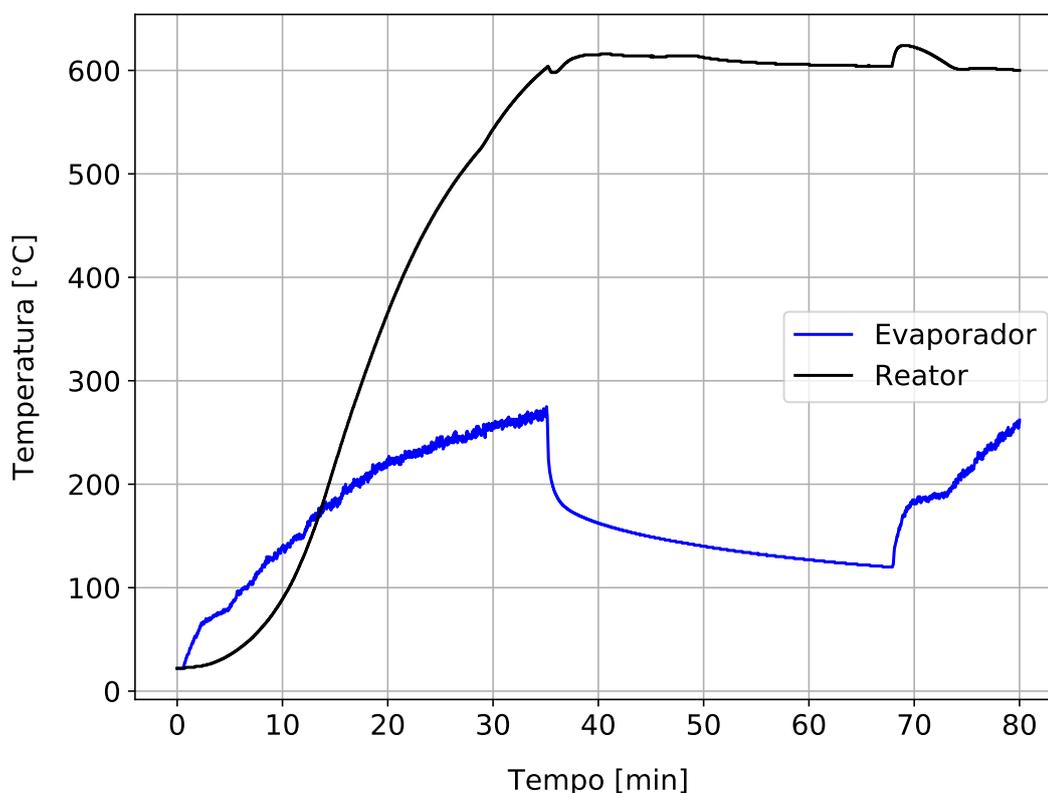
possui, como a cerâmica, uma baixa condutividade térmica.

Nota-se um decréscimo na temperatura da região de evaporação na Figura 18, Figura 19 e Figura 20. Essa variação pode ser explicada pelo resfriamento da câmara de evaporação no momento em que o bico injetor de reagentes líquidos é iniciado. Esse resfriamento é natural devido ao contato das gotículas provenientes da atomização da mistura água/etanol na região de evaporação. Após um certo período, com o injetor ligado, como pode-se observar, as temperaturas começam a se elevar.

4.4 TESTES DE EVAPORAÇÃO

Um dos desafios encontrados neste trabalho foi realizar a completa evaporação dos reagentes líquidos. A evaporação incompleta do etanol pode levar à desativação do catalisador em poucas horas, devido à formação de coque em sua superfície, comprometendo a atividade catalítica do reformador. Outro desafio a ser superado na alimentação dos reagentes na reforma auto térmica é evitar a autoignição do etanol na região de evaporação, região esta que antecede o reator, onde os reagentes são pré-misturados.

Figura 19 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 600 °C.

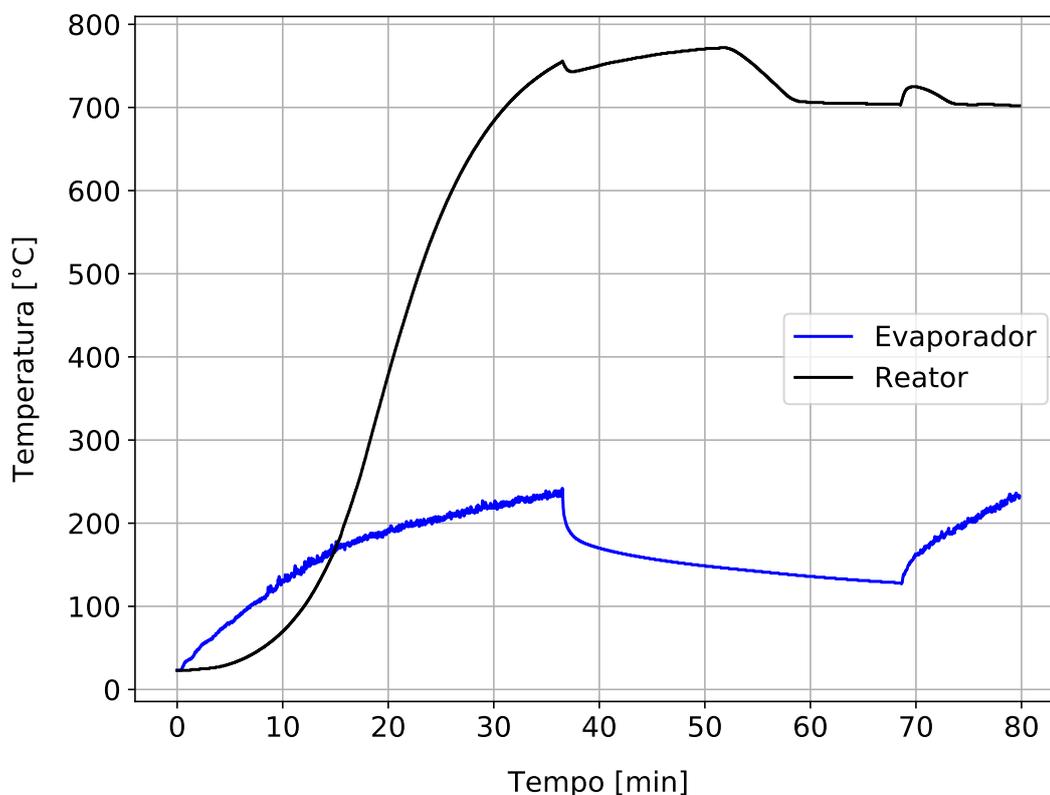


Fonte: Autor.

O limite de inflamabilidade do etanol em ar, à pressão atmosférica e temperatura ambiente está entre 3,3% e 19% (fração molar) e 0,41 e 2,8 (razão de equivalência) (ZABETAKIS, 1965; LAW, 2010). Porém, quanto maior a temperatura dos reagentes, maior a faixa de inflamabilidade do etanol, entre o limite superior e limite inferior de inflamabilidade, o que dificulta sua vaporização em temperaturas acima de 500 °C. O agente vaporizador utilizado neste trabalho foi o ar seco em conjunto com nitrogênio de diluição, diferente de outras estratégias para vaporização de combustíveis citadas neste trabalho, como por exemplo, o vapor superaquecido (PASEL; SAMSUN; MEISSNER *et al.*, 2020).

Durante os testes, tanto de aquecimento quanto de evaporação, algumas limitações técnicas foram encontradas. A principal delas foi a limitação da vazão de ar comprimido da rede em aproximadamente 17 l/min, devido à capacidade do compressor de ar e às perdas de carga na rede. Devido a isso, fixou-se a vazão de ar na entrada do sistema em 17 l/min para os testes de vaporização. Outra dificuldade observada, foi o rompimento dos fios resistivos das resistências elétricas quando o aquecedor de ar recebia escoamentos menores que 17 l/min, isso pode ser explicado pelo baixo

Figura 20 – Tempo de aquecimento do reator até a temperatura de 700 °C.



Fonte: Autor.

número de Reynolds do sistema, decorrente da baixa vazão de ar e da predominância de forças viscosas decorrentes das altas temperaturas.

Uma série de testes de evaporação foram realizados, e os resultados destes testes encontram-se na Tabela 17. Os testes de evaporação foram realizados com 3 espumas cerâmicas brancas de 40 Poros por Polegada (PPI) na região de reforma, e uma espuma de homogeneização de 10 PPI na região após a câmara de evaporação, todas as espumas de óxido de alumina (Al_2O_3) sem impregnação de níquel.

As temperaturas de aquecimento do ar, do reator e as vazões da mistura reagente água/etanol do teste são indicadas na Tabela 17 por T_{ar} [°C], T_{reator} [°C] e Vazão [g/min], respectivamente. A temperatura de pré aquecimento da mistura reagente foi mantida em 80 °C em todos os testes. A pressurização do tanque da mistura reagente água e etanol foi mantida em 3 bar para os testes. A mistura reagente água/etanol (S/E) foi testada na razão molar de 1,5:1 e a razão molar oxigênio/etanol (O/E) foi mantida em 0,5:1.

Nota-se, de acordo com a Tabela 17 que todos os testes realizados com a temperatura do ar acima de 500 °C, resultaram em uma auto-ignição da mistura. Isso

Tabela 17 – Dados dos testes de evaporação.

T_{ar} [°C]	T_{reator} [°C]	Vazão [g.min ⁻¹]	Comentários
350	300	22,46	Queda de temperatura na região de evaporação de 300°C para 80°C após 10 segundos de operação, caracterizando uma evaporação parcial da mistura.
350	400	22,46	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 70°C após 20 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura.
350	500	22,46	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 20 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura.
350	600	22,46	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 30 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura. Ignição após 30 segundos.
350	300	14,34	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 30 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura.
350	500	14,34	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 35 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura. Ignição após 35 segundos.
350	300	5,45	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 45 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura.
350	500	5,45	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 75°C após 50 segundos, caracterizando uma evaporação parcial da mistura. Ignição após 50 segundos.
300	300	1,25	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 190°C, mantendo-se constante em um período de teste aproximado de 40 segundos, o que caracteriza a completa evaporação da mistura.
300	500	1,25	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 180°C, mantendo-se constante em um período de teste aproximado de 50 segundos, o que caracteriza a completa evaporação da mistura. Ignição após 50 segundos.
300	600	1,25	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 210°C, mantendo-se constante em um período de teste aproximado de 50 segundos, o que caracteriza a completa evaporação da mistura. Ignição após 50 segundos.
300	700	1,25	Queda de temperatura na região de evaporação de 350°C para 200°C, mantendo-se constante após 55 segundos, o que caracteriza a completa evaporação da mistura. Ignição após 55 segundos.

Fonte: Autor.

pode ser explicado pela ampla faixa de inflamabilidade do etanol em temperaturas acima de 500°C, facilitando a ignição. Como hipótese, pode-se argumentar que a ignição pode ter ocorrido somente na região de reforma, pois nesta região as espumas estavam em temperaturas acima de 500°C mantidas pelas resistências externas de

aquecimento do reator, facilitando o processo de inflamabilidade.

Os eventos citados da não evaporação dos reagentes líquidos em vazões maiores pode ter ocorrido pela limitação do escoamento de ar em 17 l/min. Para estes casos, foi adotada a estratégia de aumentar a pressão de N₂ de pressurização do tanque da mistura água/etanol para 4 bar e posteriormente para 5 bar, a fim de diminuir o tamanho de gota da atomização proveniente do bico injetor, e facilitar a evaporação, porém a estratégia não se mostrou efetiva.

Durante os testes de evaporação, em regime permanente, a vazão ótima obtida da mistura líquida reagente de água/etanol foi de 1,25 g/min. Esta vazão fixa foi a vazão utilizada nos testes posteriores de branco e testes catalíticos, para as diferentes temperaturas de reforma. Os dados das vazões que o sistema foi capaz de evaporar sem ignição, são apresentadas na Tabela 18, que correspondem a um vazão da mistura líquida de 1,25 g/min.

Devido ao fato de o agente vaporizador do fluido reagente ser o ar, a vazão estimada para manter a estequiometria da reação seria de 0,8 l/min de ar ($\approx 0,17$ l/min de O₂), porém, como mostrado anteriormente, esta vazão não seria suficiente para a completa vaporização dos reagentes. Para resolver este problema foi utilizado N₂ para diluição da mistura, em uma vazão de 16,2 l/min, chegando-se a uma vazão total de oxigênio (O₂) e nitrogênio (N₂) de 17 l/min, vazão suficiente para que os reagentes evaporem e não entrem em combustão.

Tabela 18 – Vazões estabelecidas de oxigênio (O₂), etanol (C₂H₅OH), e água (H₂O) para os testes de reforma, bem como potência nominal estimada.

Temperatura [°C]	Oxigênio [L.min ⁻¹]	Etanol [mL.s ⁻¹]	Água [mL.s ⁻¹]	Potência [kW]
500	0,17	0,02	0,01	0,5
600	0,17	0,02	0,01	0,5
700	0,17	0,02	0,01	0,5

Fonte: Autor.

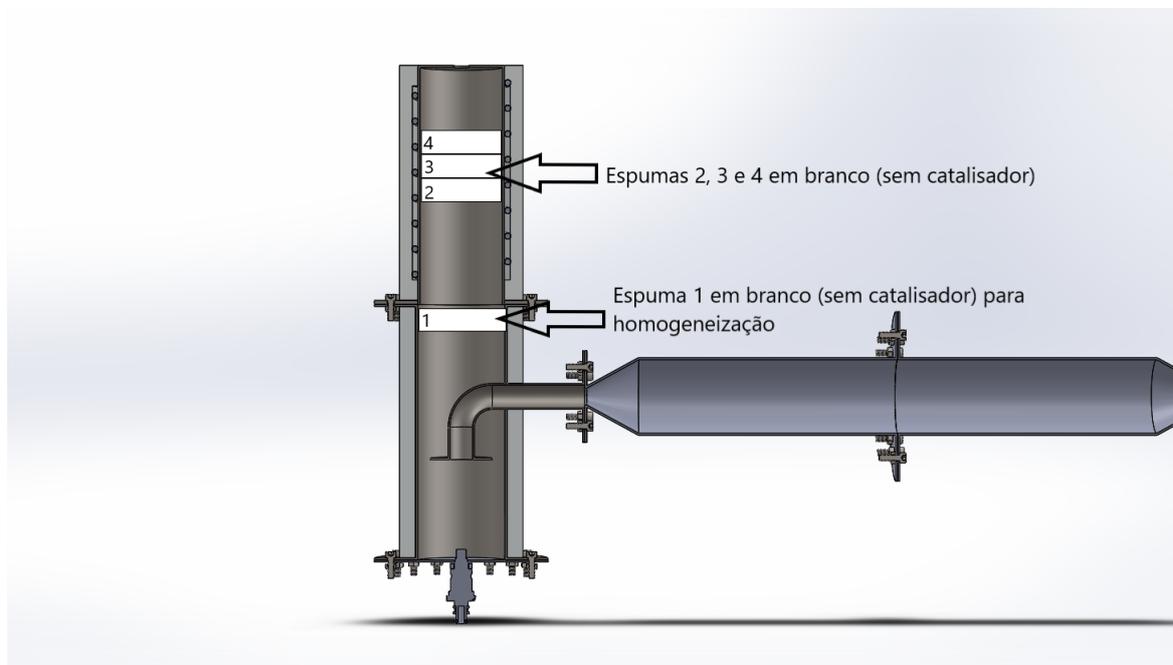
4.5 REFORMA AUTO TÉRMICA DE ETANOL

4.5.1 Testes de branco

Foram realizados testes experimentais de branco nas temperaturas de 500°C, 600°C e 700°C para avaliar a conversão de etanol. O teste de branco consiste em avaliar a quantidade de etanol reagido em espumas sem catalisador, ou seja, somente espumas de Al₂O₃ sem impregnação de níquel. A disposição das espumas para os testes de branco está representada na Figura 21. As espumas 2, 3 e 4 são espumas de 80 mm de diâmetro e 20 mm de espessura com porosidade de 40 PPI, e a espuma

1 serve como uma espuma de homogeneização do fluxo, com dimensões idênticas às anteriores, porém com porosidade de 10 PPI.

Figura 21 – Disposição das espumas para os testes de branco.



Fonte: Autor.

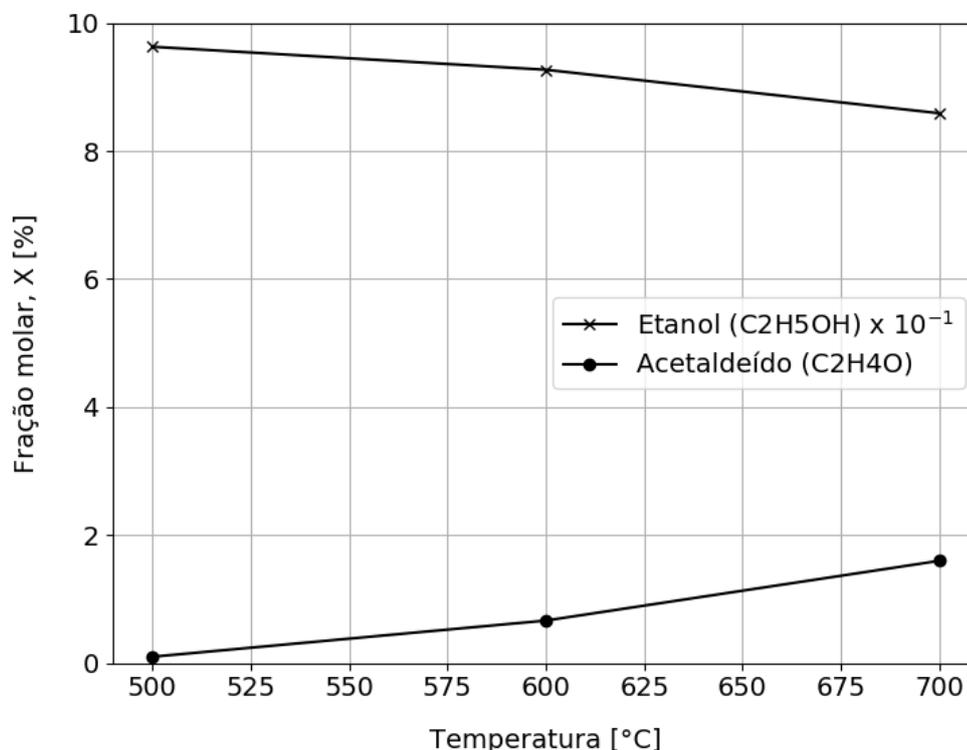
A seguir são mostrados as frações molares dos produtos obtidas nos testes experimentais de branco na reforma auto térmica do etanol, conforme mostra a Figura 22. Pode-se verificar a grande influência da temperatura na conversão de etanol. A conversão do etanol na espuma de Al_2O_3 sem impregnação de níquel, ocorre pelo favorecimento da reação de desidrogenação do etanol, formando o acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$), conforme mostra a 51.



4.5.2 Testes catalíticos

A Figura 23 mostra as frações molares dos testes da reforma auto térmica do etanol com espumas impregnadas com Níquel. Os testes foram realizados para a atividade das espumas cerâmicas e a operação da bancada experimental em regime de operação. A disposição dos catalisadores nos testes com as espumas impregnadas com níquel é ilustrada na Figura 24. Todas as espumas possuem o diâmetro de 80 mm e 20 mm de espessura. A espuma 1 possui uma porosidade de 10 PPI e serve para a homogeneização do fluxo. As espumas 2 e 5 são espumas com 40 PPI sem

Figura 22 – Fração molar dos produtos para os testes de branco de reforma auto térmica de etanol na bancada experimental desenvolvida.



Fonte: Autor.

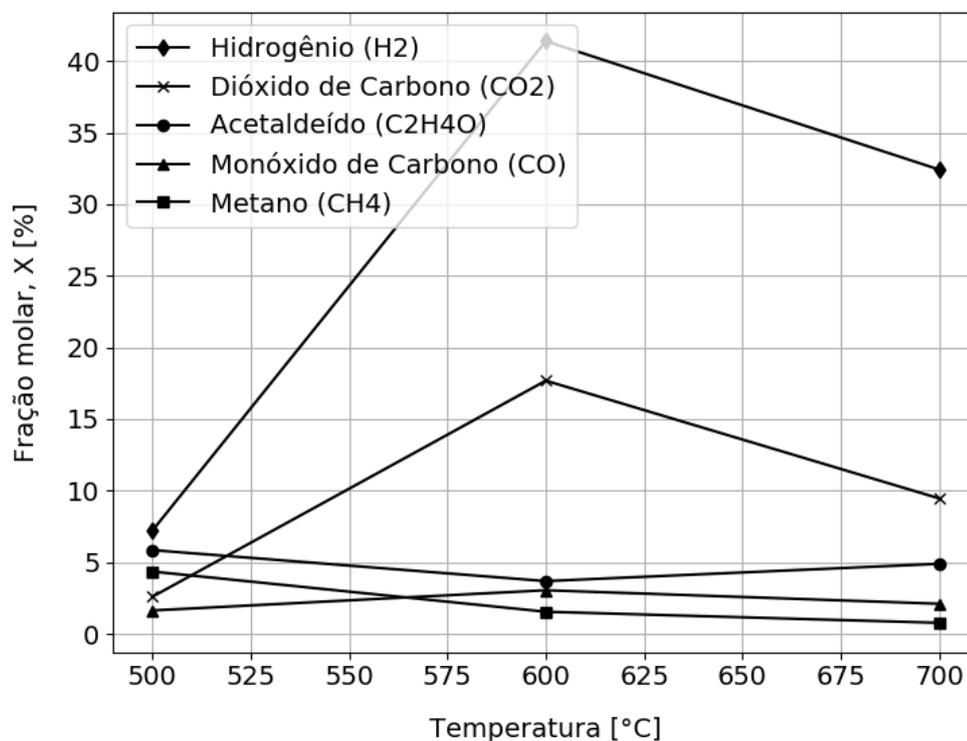
impregnação de níquel, e servem para homogenizar e proteger os catalisadores. As espumas 3 e 4 são espumas com impregnação de níquel, possuem 40 PPI.

A produção de H₂ via reforma auto térmica de etanol ocorre por meio de várias rotas e processos de decomposição, onde o etanol é decomposto em várias espécies, tais como, metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), acetaldeído (C₂H₄O), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) (HARYANTO *et al.*, 2005a; FORESTI; MANZOLINI, 2016).

Pode-se perceber a grande influência do oxigênio para a reação, que reage com CO formando CO₂, conforme Equação (52). Acima da temperatura de 500°C nota-se um decréscimo constante do metano (CH₄), isso acontece devido à ocorrência da reação de oxidação parcial Equação (53) ou reforma a vapor Equação (54) do metano, conforme indicado pela Equação (53) (SPALLINA *et al.*, 2018).



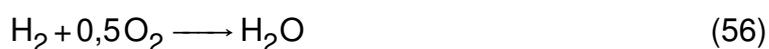
Figura 23 – Fração molar dos produtos para os testes catalíticos de reforma auto térmica de etanol na bancada experimental desenvolvida.



Fonte: Autor.

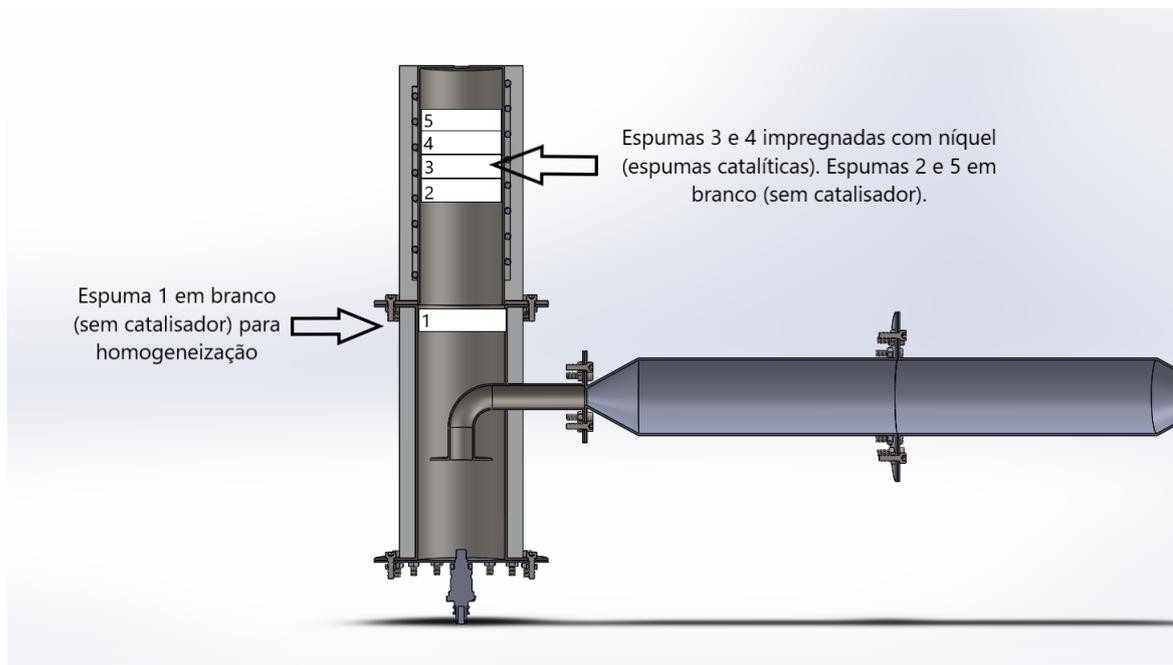


O decréscimo na produção de acetaldeído (C₂H₄O), a medida em que a temperatura da reação aumenta, indica a atividade do catalisador para a quebra da ligação C-C presente no acetaldeído, demonstrada na Equação (55). Uma diminuição na produção de hidrogênio (H₂) na temperatura de 700°C quando comparada à produção na temperatura de 600°C, pode ser explicada pelo favorecimento da reação de oxidação do hidrogênio formando água, conforme Equação (56) (RAO *et al.*, 2023).



Pode-se constatar entre as temperaturas de 500°C e 600°C uma alta produção de hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂), isso pode ser explicado pelo favorecimento da reação de deslocamento água-gás (*Water Gas Shift* (WGS)), onde o monó-

Figura 24 – Disposição das espumas para os testes com catalisador.



Fonte: Autor.

xido de carbono (CO) reage na presença de água como mostrado na Equação (57), formando dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) (LI *et al.*, 2022).



Os testes catalíticos mostraram pontos importantes trazidos na revisão da literatura, tais como análises termodinâmicas da reação auto térmica de etanol para produção de gases ricos em hidrogênio. Um ponto importante a ser considerado é a influência da temperatura de reforma na reação. Nos testes catalíticos pode-se observar que o comportamento da produção de hidrogênio segue uma tendência de aumento em temperaturas acima de 500 °C, e a produção de metano sofre um decréscimo com o aumento gradual de temperatura, o que favorece a alimentação de células a combustível do tipo SOFC (SUN, S. *et al.*, 2012).

4.6 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO SISTEMA

A eficiência de todo o sistema reformador da bancada foi avaliada pela eficiência térmica geral, que pode ser calculada pela razão entre a saída de energia, pela entrada de energia geral do sistema, expressa pela Equação (58) (VITA *et al.*, 2019; NORTHROP; CHOI; THOMPSON, 2012).

$$\eta_{\text{térmica}} = \left(\frac{\dot{m}_{\text{H}_2} \text{LHV}_{\text{H}_2}}{\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} \text{LHV}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} + Q_e} \right) \times 100, [\%] \quad (58)$$

A energia que sai do sistema, elencada no numerador traz o produto entre a vazão mássica de hidrogênio (\dot{m}_{H_2}) que sai do reformador pelo seu poder calorífico inferior (LHV_{H_2}). E a energia que entra no sistema, demonstrada no denominador da Equação (58), traz o produto entre a vazão mássica do combustível (etanol) que entra no reator ($\dot{m}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$) e o poder calorífico inferior do etanol ($\text{LHV}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}$). A energia que entra no sistema é complementada pela potência fornecida ao sistema (Q_e), sendo a potência total do sistema, ou seja, a potência das resistências elétricas utilizadas para vaporização e aquecimento do reator.

A análise da eficiência térmica do sistema é apresentada na Tabela 19, que traz os três valores avaliados no presente trabalho, ou seja, para as temperaturas de reforma de 500 °C, 600 °C e 700 °C, bem como um valor teórico da literatura.

Tabela 19 – Eficiência térmica do sistema no presente trabalho em diferentes temperaturas comparada com a literatura.

Dados	$\eta_{\text{térmica}}$ [%]
Presente trabalho com temperatura de reforma à 500 °C e vazão de entrada fixa	18
Presente trabalho com temperatura de reforma à 600 °C e vazão de entrada fixa	26
Presente trabalho com temperatura de reforma à 700 °C e vazão de entrada fixa	22
Análise termodinâmica desenvolvida por Khila <i>et al.</i> (2013)	82

Fonte: Autor.

A tabela traz o valor da análise termodinâmica realizada por Khila *et al.* (2013). A análise termodinâmica é realizada utilizando o programa comercial ASPEN Plus, e traz um valor de eficiência para a reforma auto térmica de etanol de 82%. No presente trabalho foram calculadas as eficiências obtidas para as temperatura de 500 °C, 600 °C e 700 °C, correspondendo às frações molares de saída de hidrogênio em 7,19%, 41,38% e 32,41%, respectivamente.

Para o cálculo de eficiência do sistema reformador do presente trabalho, para o valor da energia fornecida ao sistema (Q_e), são consideradas as potências utilizadas para o aquecimento do ar e do reator, totalizando em 9,5 kW.

A distância dos valores de eficiência calculados para o presente trabalho comparados ao valor teórico, pode ser explicada pela diluição da mistura na entrada do reator, promovida pelo escoamento de N_2 , fazendo com que o sistema utilize a potência disponível para aquecer um gás que escoar de forma inerte pelo reator. Outro fator, seria a não mensuração dos períodos que a potência elétrica é fornecida ao sis-

tema, pois como opera de forma automatizada, a potência é fornecida ou interrompida conforme o sistema atinge ou não a temperatura ajustada nos controladores.

No presente trabalho não foi utilizada nenhuma forma de recuperação de energia térmica, ou seja, nenhuma possível reutilização dos gases reformados para auxiliar em algum pré aquecimento do sistema. Cabe ressaltar que o objetivo principal da presente pesquisa não foi o projeto e desenvolvimento de um sistema de reforma energeticamente eficiente, mas sim o desenvolvimento de um sistema que fosse capaz de operar e realizar a reforma auto térmica do etanol em regime permanente, e tal objetivo foi satisfeito.

A análise de eficiência foi realizada no âmbito de mapear pontos a serem melhorados no sistema. Os valores de eficiência nos mostram que o sistema de evaporação é o principal responsável pelo decréscimo da eficiência. Isso se dá pelo fato de o agente evaporador (ar) ser diluído em nitrogênio, para manter a vazão necessária do escoamento, e evitar a ruptura das resistências. Dessa maneira, boa parte da potência do sistema de aquecimento do ar, e do sistema de aquecimento do reator, consomem energia para aquecer um gás inerte (nitrogênio) durante a reforma, fazendo com que a eficiência do sistema diminua.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, bem como sugestões para a realização de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado o projeto, a construção e testes de um reator para reforma auto térmica do etanol com objetivo de geração de gases ricos em hidrogênio. O sistema de reforma foi desenvolvido controla de forma automatizada as temperaturas de evaporação e de reforma, bem como controla de forma automática a injeção dos reagente líquidos. O catalisador utilizado para a reforma auto térmica do etanol foi um monólito de óxido de alumina impregnado com níquel ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$). As principais conclusões acerca das atividades desenvolvidas são elencadas a seguir.

5.1.1 Projeto do Sistema

- A engenharia do produto por meio de processos de conformação de chapas metálicas se mostrou acessível para a confecção do sistema com baixo tempo para produção, baixa complexidade de construção e montagem, com peças de fácil produção para possível escala comercial;
- O sistema eletrônico de controle se mostrou bastante eficiente e preciso para os controles de temperatura e para o controle da vazão de alimentação dos reagentes líquidos;
- A escolha pela chapa de INOX 310 foi satisfatória, devido à sua elevada resistência à oxidação em altas temperaturas, em torno de 700 °C;
- O isolamento de todo o sistema de reforma, aquecimento do ar e evaporação com fibra de cerâmica contribuiu para a diminuição no tempo de aquecimento e inicialização do sistema;
- Realizar testes com maiores vazões de reagentes, com objetivo de aumentar o número de Reynolds dos escoamentos, e avaliar os impactos decorrentes, tais como, redução no tempo de inicialização e aumento dos coeficientes convectivos internos.

5.1.2 Evaporação dos Reagentes Líquidos

- O sistema de injeção de ar aquecido em contra corrente com os fluidos reagentes se mostrou efetiva para promover a evaporação dos reagentes líquidos;

- Verificou-se a dificuldade de realizar a vaporização dos fluidos reagentes somente com o ar da reforma, pois o contato do oxigênio com o fluido reagente, aliado à uma atmosfera em elevada temperatura, faz com que o combustível entre em ignição;
- A evaporação se mostrou eficiente em uma vazão mássica de 1,25 g/min da mistura água/etanol, em uma proporção molar de 1,5:1. Para tal foi utilizado 16,2 l/min de N₂ para diluição e 0,8 l/min de ar comprimido para reforma, totalizando 17 l/min do agente evaporador.

5.1.3 Testes Catalíticos

- As maiores taxas de conversão de etanol, nos testes de branco (espuma sem catalisador), foram observadas em temperaturas maiores;
- Nos testes com espumas catalíticas foram observados baixos índices de produção de metano (CH₄), à medida que a temperatura de reforma aumentava, característica positiva para a utilização do sistema reformador em células a combustível do tipo SOFC;
- Foram observados baixos índices de monóxido de carbono (CO) em temperaturas acima de 600 °C, o que caracteriza um bom parâmetro para a utilização do sistema em células a combustível do tipo SOFC;
- A maior produção de Hidrogênio (H₂) nos testes de reforma auto térmica com catalisador, ocorreu na temperatura de 600 °C.

5.1.4 Eficiência do Sistema

- Constatou-se um decréscimo nos valores de eficiência térmica no sistema, devido à diluição do escoamento evaporador (ar) com um gás inerte (nitrogênio);
- Baixas vazões do escoamento implicam em uma diminuição da eficiência, devido aos baixos coeficientes de convecção interna do escoamento;
- O maior valor de eficiência ocorre na reforma auto térmica do etanol, a uma temperatura de reforma de 600 °C, com um valor de 26%.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Investigar outras maneiras de evaporação dos reagentes líquidos, como por exemplo, a utilização de vapor superaquecido como agente vaporizador, sem que haja a necessidade de utilizar nitrogênio como diluente, visando um incremento da eficiência;

2. Realizar reformas do tipo Oxidação Parcial (POX) e Reforma a Vapor (SR) na bancada, e avaliar a produção dos gases;
3. Testar a estratégia de injeção do oxigênio em uma região próxima do catalisador na reforma auto térmica de etanol, a fim de evitar ignições do combustível;
4. Testar outros tipos de metais como agente catalisador do monólito, como ródio e platina, e avaliar a composição dos gases reformados;
5. Investigar outras maneiras de aquecimento do sistema para minimizar o tempo de inicialização, como por exemplo, a utilização de um *start burner*;
6. Realizar a análise da energia elétrica consumida em todo o sistema durante os testes, a fim de quantificar de maneira exata a potência consumida durante o processo;
7. Realizar testes com maiores vazões na entrada do reator, com objetivo de aumentar o número de Reynolds dos escoamentos, e avaliar os impactos decorrentes, tais como, redução no tempo de inicialização e aumento dos coeficientes convectivos internos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, Avinash Kumar. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in energy and combustion science**, Elsevier, v. 33, n. 3, p. 233–271, 2007.

AGRAFIOTIS, Christos; TSETSEKOU, Athena. The effect of powder characteristics on washcoat quality. Part I: Alumina washcoats. **Journal of The European Ceramic Society - J EUR CERAM SOC**, v. 20, p. 815–824, jun. 2000.

AKANSU, Selahaddin Orhan *et al.* Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 40, p. 25781–25790, 2017. ISSN 0360-3199. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.014>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917327039>.

ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew NO. **Fundamentos de circuitos elétricos**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.

ALRAZEN, Hayder A *et al.* A review of the effect of hydrogen addition on the performance and emissions of the compression–Ignition engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 54, p. 785–796, 2016.

ASME. **American Society of Mechanical Engineers - ASME - Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 1**. [S.l.: s.n.], 2019.

AYAD, Sami M.M.E. *et al.* Analysis of performance parameters of an ethanol fueled spark ignition engine operating with hydrogen enrichment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 8, p. 5588–5606, 2020. 22nd World Hydrogen Energy Conference. ISSN 0360-3199. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.151>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919320385>.

BARUAH, Renika *et al.* Advances in ethanol autothermal reforming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 51, p. 1345–1353, 2015.

BAUER, CG; FOREST, TW. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on SI engine performance. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 55–70, 2001.

BERGMAN, Theodore L *et al.* **Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

BOLES, Michael A; CENGEL, Yunus A. **Thermodynamics: an engineering approach**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1989.

CAVALLARO, S *et al.* Hydrogen production by auto-thermal reforming of ethanol on Rh/Al₂O₃ catalyst. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 123, n. 1, p. 10–16, 2003.

CENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Tranferência de Calor e Massa**. [S.l.]: AMGH editora, 2009.

CHIU, Wei-Cheng; HORNG, Rong-Fang; CHOU, Huann-Ming. Hydrogen production from an ethanol reformer with energy saving approaches over various catalysts. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 6, p. 2760–2769, 2013.

DU, Yaodong *et al.* Effect of addition of hydrogen and exhaust gas recirculation on characteristics of hydrogen gasoline engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 12, p. 8288–8298, 2017. ISSN 0360-3199. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.197>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917307796>.

FIUZA, Raigenis da Paz *et al.* A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 35, n. 8, p. 1635–1643, 2012.

FORESTI, Stefano; MANZOLINI, Giampaolo. Performances of a micro-CHP system fed with bio-ethanol based on fluidized bed membrane reactor and PEM fuel cells.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 21, p. 9004–9021, 2016. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.210>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915319935>.

FRANZELLI, Benedetta; ROCCHI, Jean-Philippe; WOLF, Pierre. *Cantera tutorial-V2*.

GHAZAL, Osama H. Performance and combustion characteristic of CI engine fueled with hydrogen enriched diesel. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 35, p. 15469–15476, 2013.

GLASSMAN, Irvin; YETTER, Richard A; GLUMAC, Nick G. **Combustion**. [S.l.]: Academic press, 2014.

GRASCHINSKY, Cecilia *et al.* Thermodynamic analysis of hydrogen production by autothermal reforming of ethanol. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 37, n. 13, p. 10118–10124, 2012.

GREENWOOD, JB *et al.* Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 39, n. 24, p. 12980–12990, 2014.

HARYANTO, Agus *et al.* Current Status of Hydrogen Production Techniques by Steam Reforming of Ethanol: A Review. **Energy & Fuels**, v. 19, n. 5, p. 2098–2106, 2005. DOI: 10.1021/ef0500538. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef0500538>.

- HARYANTO, Agus *et al.* Current status of hydrogen production techniques by steam reforming of ethanol: a review. **Energy & Fuels**, ACS Publications, v. 19, n. 5, p. 2098–2106, 2005.
- HEYWOOD, JB. 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York.
- HUNG, Chih-Cheng *et al.* Oxidative steam reforming of ethanol for hydrogen production on M/Al₂O₃. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 37, n. 6, p. 4955–4966, 2012.
- KARAGÖZ, Yasin; BALCI, Özgün; KÖTEN, Hasan. Investigation of hydrogen usage on combustion characteristics and emissions of a spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 44, n. 27, p. 14243–14256, 2019.
- KHILA, Zouhour *et al.* A comparative study on energetic and exergetic assessment of hydrogen production from bioethanol via steam reforming, partial oxidation and auto-thermal reforming processes. **Fuel Processing Technology**, v. 112, p. 19–27, 2013. ISSN 0378-3820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.02.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382013000830>.
- KIM, Joonsuk *et al.* Hydrogen effects on the combustion stability, performance and emissions of a turbo gasoline direct injection engine in various air/fuel ratios. **Applied Energy**, v. 228, p. 1353–1361, 2018. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.129>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191830998X>.
- LAW, Chung K. **Combustion physics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2010.
- LI, Yueqi *et al.* Feasibility analysis of water gas shift reaction for the removal of trace CO in hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2022. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.107>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922031214>.
- LIU, Shuo *et al.* Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production from Oxidative Steam Reforming of Ethanol. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 2, p. 1365–1370, 2008. DOI: 10.1021/ef700614d.
- MARINOV, Nick M. A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation. **International Journal of Chemical Kinetics**, Wiley Online Library, v. 31, n. 3, p. 183–220, 1999.
- MOSER, Rafael Hafemann. Estudo da combustão de gás natural, butano e etanol em meio poroso para a produção de gás de síntese [dissertação]. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 94 p. 2011.

NI, Meng; LEUNG, Dennis YC; LEUNG, Michael KH. A review on reforming bio-ethanol for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 32, n. 15, p. 3238–3247, 2007.

NORTHROP, William F.; CHOI, Sang Ok; THOMPSON, Levi T. Thermally integrated fuel processor design for fuel cell applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 4, p. 3447–3458, 2012. International Conference on Renewable Energy (ICRE 2011). ISSN 0360-3199. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.034>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911025328>.

PALM, Maíra Oliveira. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MONOLITOS CATALÍTICOS PARA REAÇÃO DE REFORMA A VAPOR E OXIDAÇÃO PARCIAL DE ETANOL. **Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC**, 2018.

PALM, Maira Oliveira *et al.* On the effect of the washcoat on partial oxidation and steam reforming of ethanol on Ni/Al₂O₃ monolith in short contact time reactors. **Energy & Fuels**, ACS Publications, 2020.

PASEL, J.; MEISSNER, J. *et al.* Autothermal reforming of commercial Jet A-1 on a 5kWe scale. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 18, p. 4847–4858, 2007. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.060>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319907004302>.

PASEL, Joachim; LATZ, Jochen *et al.* Autothermal Reforming of Jet A-1 and Diesel: General Aspects and Experimental Results. **Fuel Cell Seminar 2007**, v. 12, p. 589–600, jan. 2008. DOI: 10.1149/1.2921585.

PASEL, Joachim; SAMSUN, Remzi Can; MEISSNER, Jan *et al.* Recent advances in diesel autothermal reformer design. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 3, p. 2279–2288, 2020. ISSN 0360-3199. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.137>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919343599>.

PASEL, Joachim; SAMSUN, Remzi Can; TSCHAUDER, Andreas *et al.* A novel reactor type for autothermal reforming of diesel fuel and kerosene. **Applied Energy**, v. 150, p. 176–184, 2015. ISSN 0306-2619. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.038>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915004936>.

PASEL, Joachim; SAMSUN, Remzi Can; TSCHAUDER, Andreas *et al.* Advances in autothermal reformer design. **Applied Energy**, v. 198, p. 88–98, 2017. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.055>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917304518>.

PENG, Y.; RICHARDSON, J.T. Properties of ceramic foam catalyst supports: one-dimensional and two-dimensional heat transfer correlations. **Applied Catalysis A: General**, v. 266, n. 2, p. 235–244, 2004. ISSN 0926-860X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.02.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X04001255>.

PETKOV, T; VEZIROĞLU, TN; SHEFFIELD, JW. An outlook of hydrogen as an automotive fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 449–474, 1989.

PINNA, Francesco. Supported metal catalysts preparation. **Catalysis Today**, v. 41, p. 129–137, mai. 1998.

RABENSTEIN, Gerd; HACKER, Viktor. Hydrogen for fuel cells from ethanol by steam-reforming, partial-oxidation and combined auto-thermal reforming: A thermodynamic analysis. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 185, n. 2, p. 1293–1304, 2008.

RAGLAND, Kenneth W; BRYDEN, Kenneth M. **Combustion engineering**. [S.l.]: CRC press, 2011.

RAO, Mumin *et al.* Direct carbon dioxide-methane solid oxide fuel cells integrated for high-efficiency power generation with La_{0.75}Sr_{0.25}Cr_{0.5}Fe_{0.4}Ni_{0.1}O₃—based dry reforming catalyst. **Separation and Purification Technology**, v. 307, p. 122831, 2023. ISSN 1383-5866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122831>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586622023887>.

REVANKAR, Shripad T; MAJUMDAR, Pradip. **Fuel cells: principles, design, and analysis**. [S.l.]: CRC press, 2016.

SPALLINA, V. *et al.* Direct route from ethanol to pure hydrogen through autothermal reforming in a membrane reactor: Experimental demonstration, reactor modelling and design. **Energy**, v. 143, p. 666–681, 2018. ISSN 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217318765>.

SUN, Shaohui *et al.* Thermodynamic analysis of ethanol reforming for hydrogen production. **Energy**, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 911–924, 2012.

SUN, Zuo-yu *et al.* Research and development of hydrogen fuelled engines in China. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 664–681, 2012.

AL-THEHABEY, Omar Yousef. Investigating the trend of hydrogen's flame velocity profile in relation to pressure and temperature above and below the adiabatic point. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 76, p. 38089–38105, 2021. ISSN

0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.049>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921035291>.

TIPPAWAN, Phanicha; ARPORNWICHANOP, Amornchai. Energy and exergy analysis of an ethanol reforming process for solid oxide fuel cell applications. **Bioresource technology**, Elsevier, v. 157, p. 231–239, 2014.

URNS, Stephen R *et al.* **An introduction to combustion**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1996. v. 499.

VASUDEVA, K *et al.* Steam reforming of ethanol for hydrogen production: thermodynamic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 13–18, 1996.

VERHELST, Sebastian; WALLNER, Thomas. Hydrogen-fueled internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier, v. 35, n. 6, p. 490–527, 2009.

VIDAL, Jaisson *et al.* DESIGN AND VALIDATION OF AN ETHANOL AUTOTHERMAL REFORMER. *In*: 19TH Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Bento Gonçalves: [s.n.], 2022.

VITA, Antonio *et al.* Chapter 6 - Steam Reforming, Partial Oxidation, and Autothermal Reforming of Ethanol for Hydrogen Production in Conventional Reactors. *In*: BASILE, Angelo *et al.* (Ed.). **Ethanol**. [S.l.]: Elsevier, 2019. P. 159–191. ISBN 978-0-12-811458-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811458-2.00006-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114582000067>.

WANG, Weiping; WANG, Zhifei *et al.* Partial oxidation of ethanol to hydrogen over Ni–Fe catalysts. **Catalysis letters**, Springer, v. 81, n. 1-2, p. 63–68, 2002.

WANG, Xin; LÜ, Xin. Chapter 3 - More than biofuels: use ethanol as chemical feedstock. *In*: LÜ, Xin (Ed.). **Advances in 2nd Generation of Bioethanol Production**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2021. (Woodhead Publishing Series in Energy). P. 31–51. ISBN 978-0-12-818862-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818862-0.00001-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128188620000017>.

YILMAZ, İlker; TAŞTAN, Murat. Investigation of hydrogen addition to methanol-gasoline blends in an SI engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 44, p. 20252–20261, 2018. The International Advanced Researches and Engineering Congress-2017 (IAREC 2017), 16-18 November 2017, Osmaniye, Turkey. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.088>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918322420>.

YU, Xiumin; DU, Yaodong *et al.* Effects of hydrogen direct injection strategy on characteristics of lean-burn hydrogen–gasoline engines. **Fuel**, Elsevier, v. 208, p. 602–611, 2017.

YU, Xiumin; GUO, Zezhou *et al.* Experimental study on lean-burn characteristics of an SI engine with hydrogen/gasoline combined injection and EGR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 26, p. 13988–13998, 2019. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.236>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919312959>.

ZABETAKIS, Michael G. **Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors**. [S.l.]: US Bureau of Mines Bulletin, United States Government Printing Office, Washington., 1965. v. 627.

ZEITOUNE, Jéssica Florinda. Production of Ni-based catalytic monoliths for ethanol autothermal reforming [dissertação em preparação]. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, dissertação de mestrado em preparação, 2023.

ZHANG, Bo; JI, Changwei; WANG, Shuofeng. Performance of a hydrogen-enriched ethanol engine at unthrottled and lean conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 114, p. 68–74, 2016. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416300218>.

Apêndices

APÊNDICE A – IMAGENS DA BANCADA

Figura 25 – Sistema de aquecimento do ar e resistências do tipo cruzeta (à esquerda) e sistema de evaporação e reator (à direita) na fase de pré-montagem.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Forno de aquecimento do reator.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Sistema de injeção / Vela de pré aquecimento dos reagentes líquidos.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Tanque de armazenamento e pressurização dos reagentes líquidos.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Saída dos gases do reator (à esquerda), sistema trocador de calor para resfriamento dos gases (ao centro) e controladores de vazão (à direita).



Fonte: Autor.

Figura 30 – Interface de operação, com controladores de temperatura, botão liga/desliga, controlador PWM e sinais luminosos de operação.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Equipamento para aquisição de temperaturass AGILENT (à esquerda) e controlador do sistema de aquecimento do reator (à direita).



Fonte: Autor.

Figura 32 – Disjuntores de alimentação (à esquerda) e contadores de acionamento (à direita).



Fonte: Autor.

Figura 33 – Cromatógrafo gasoso utilizado para para identificação dos gases reformados.



Fonte: Autor.

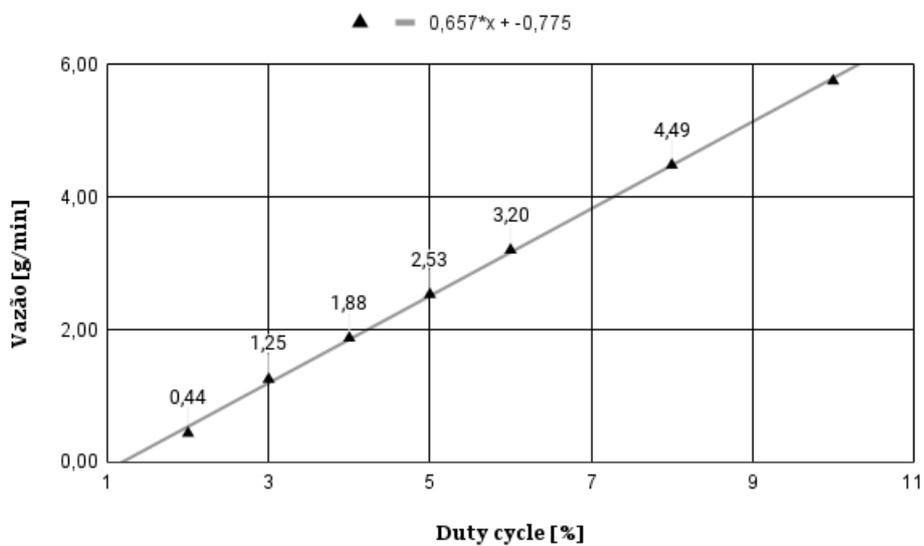
Figura 34 – Vista completa da bancada.



Fonte: Autor.

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO BICO INJETOR

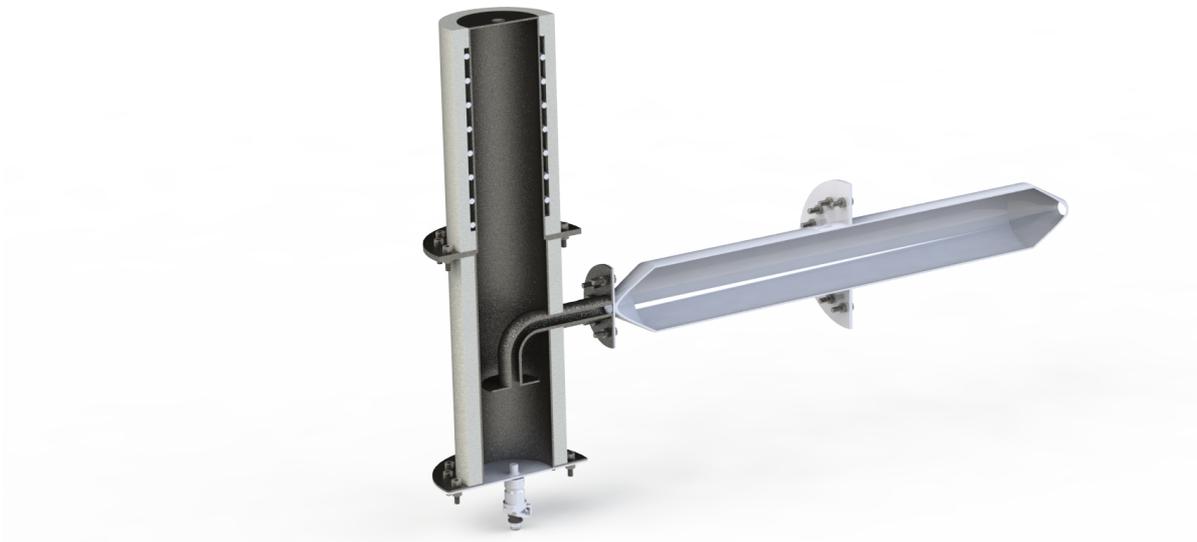
Figura 35 – Gráfico representando a vazão mássica da mistura água/etanol em função do tempo de abertura do ciclo.



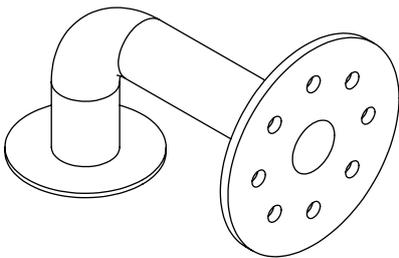
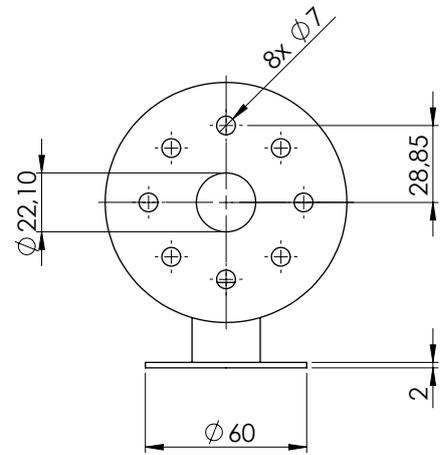
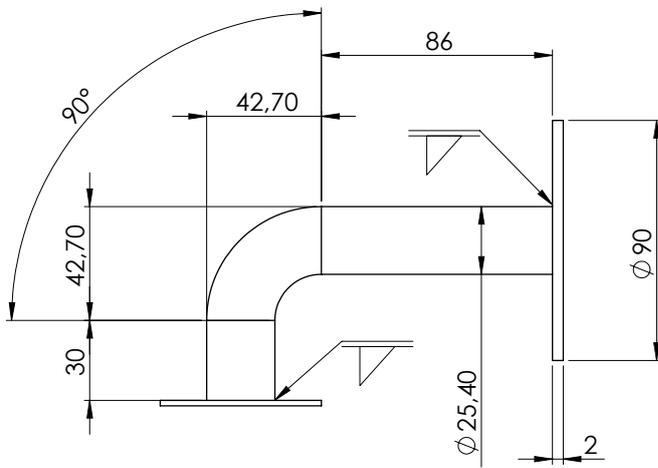
Fonte: Autor.

APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS

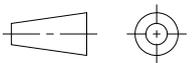
Figura 36 – Renderização do projeto em corte de seção.

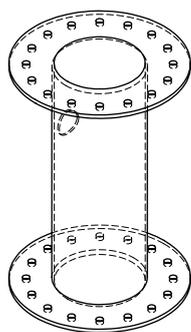
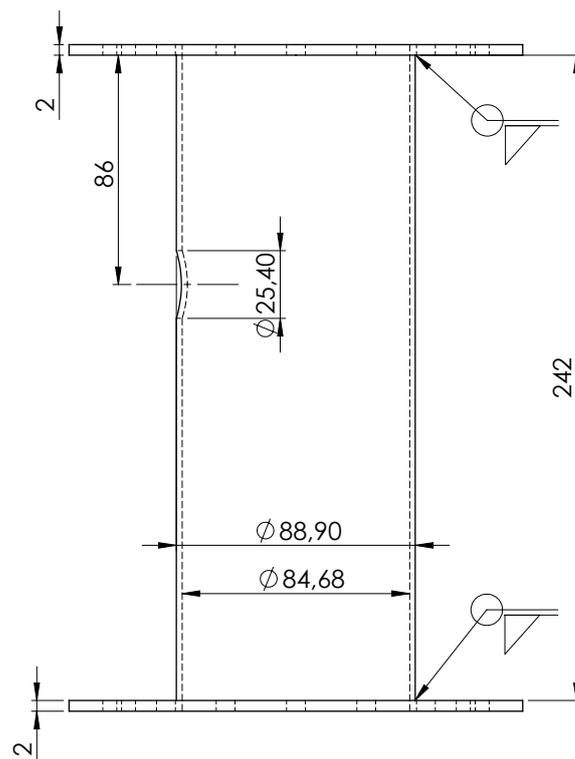
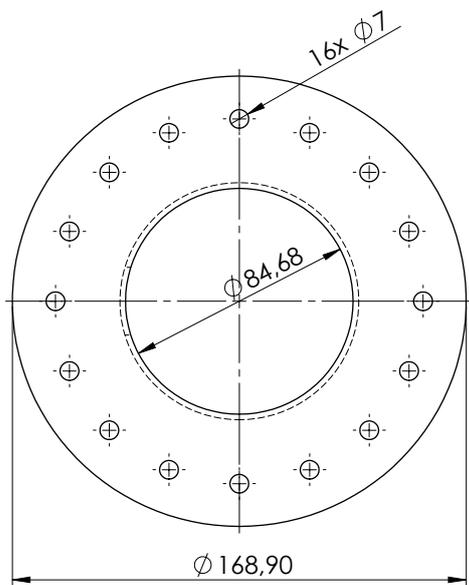


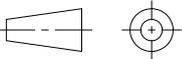
Fonte: Autor.

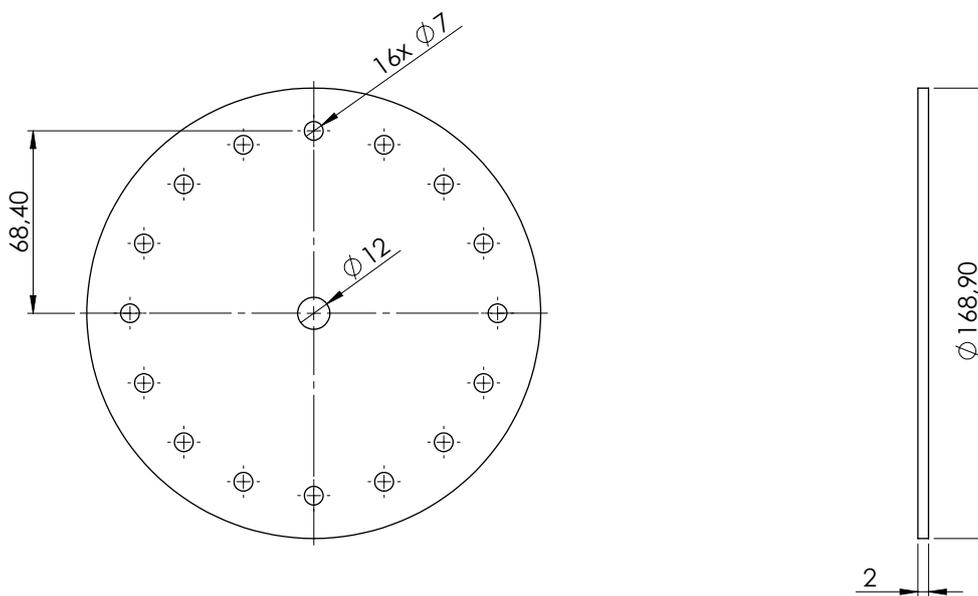


UFSC Joinville		Data: 23/08/2021
Quantidade		
1	Denominação	
	Código: P06	
	Material: INOX 304	
	Processo: Usinagem e solda	
		Escala: 1:2
		Formato: A4

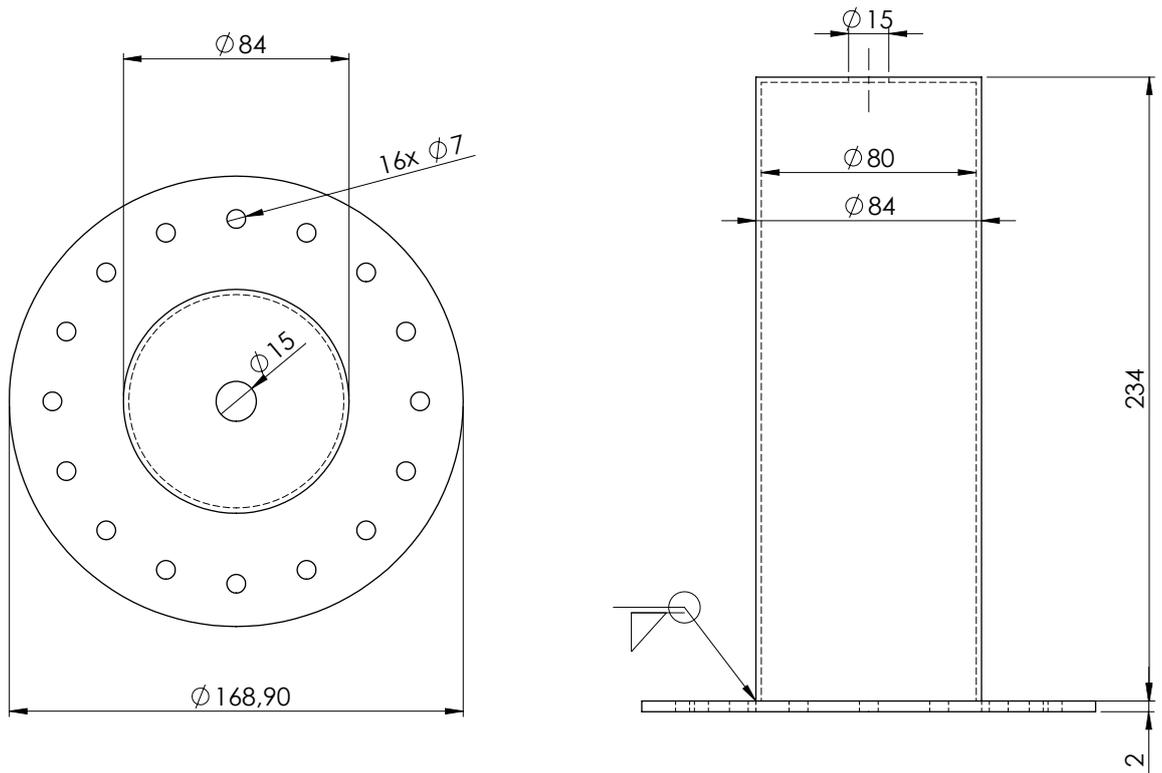




UFSC Joinville		Data: 06/09/2021	
Quantidade	Denominação		
1			
	Código: P08.1		
	Material: INOX 310		Escala: 1:2
	Processo: Corte, furação e solda		Formato: A4

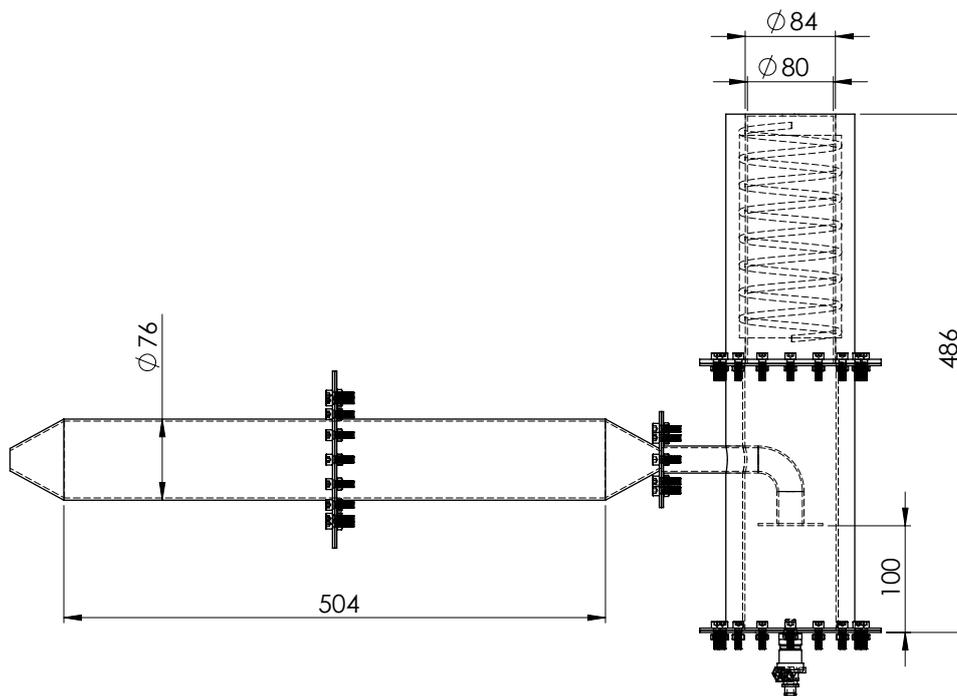


UFSC Joinville		Data: 24/08/2021	
Quantidade	Denominação		
1	Código: P09		
	Material: INOX 310		Escala: 1:2
	Processo: Usinagem e furação		Formato: A4



UFSC Joinville		Data: 06/09/2021
Quantidade		
1	Denominação	
	Código: P13	
	Material: INOX 310	
	Processo: Corte, furação e solda	Formato: A4

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.



UFSC Joinville		Data: 06/09/2021
Quantidade		
1	Denominação	
	Código: Sistema Reformador	Escala: 1:5
	Material: INOX 310	Formato: A4
	Processo: Corte, furação e solda	

APÊNDICE D – PROJETO ELÉTRICO DO SISTEMA DE CONTROLE



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATATINA

Enderego: R. Dona Francisca, 8300 Bloco U
Zona Industrial Norte- Joinville - SC

CEP 89219-600

Aluno: JAISSON VIDAL

Responsável Técnico:

Jaiisson Vidal

Projeto:

SISTEMA DE CONTROLE DO REATOR PARA
REFORMA AUTOTÉRMICA DE ETANOL

Data do Projeto

10/01/2023

Num. Total de Páginas

14

INFORMAÇÕES

PAINEL: CONTROLADOR DE TEMPERATURA

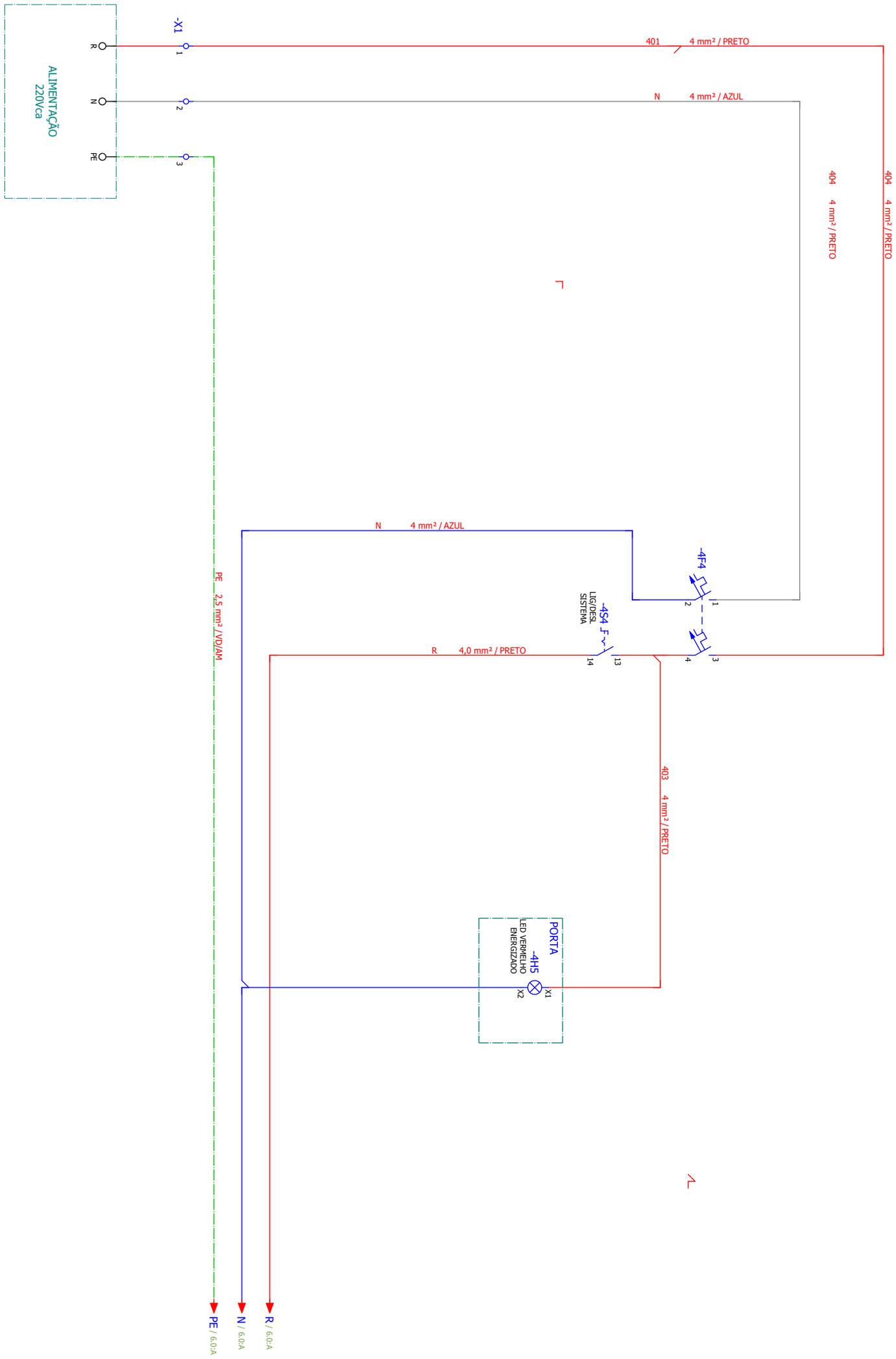
TENSÃO DE FORÇA: 220Vca

TENSÃO DE COMANDO: 12Vcc,24Vcc

COR DA FIAÇÃO

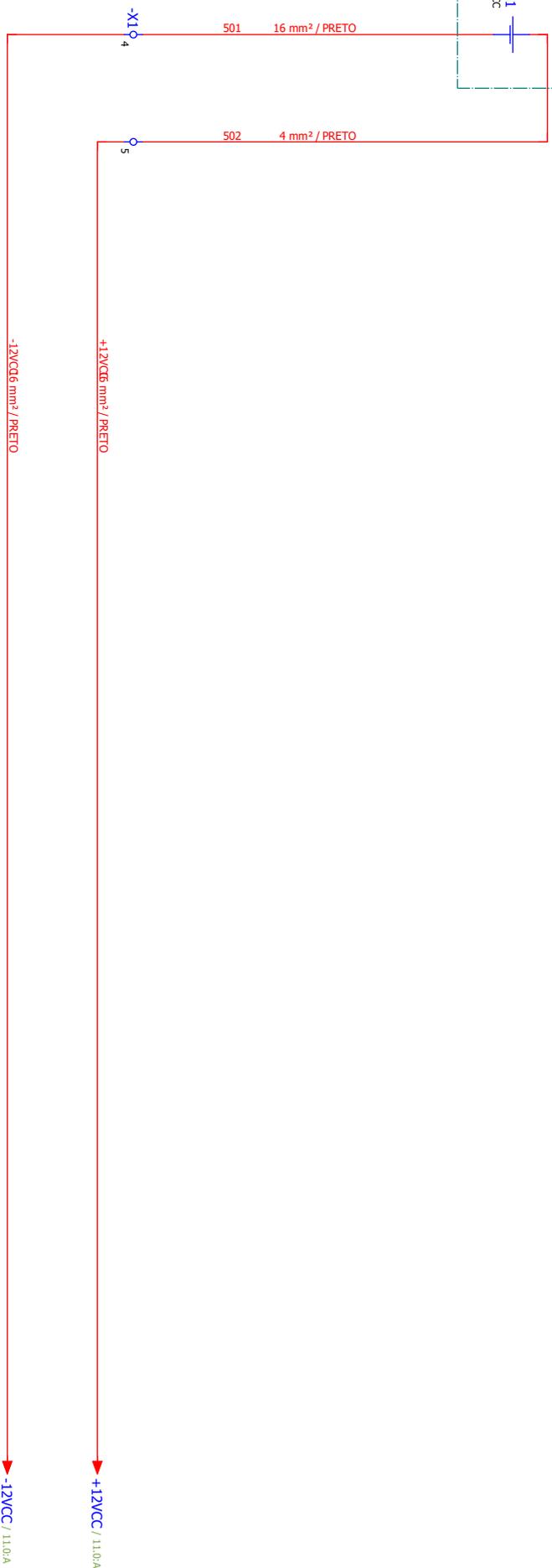
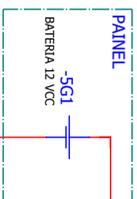
POTÊNCIA: PRETO
NEUTRO: AZUL
TERRA: VERDE
COMANDO CA (F/N): - PRETO/AZUL
COMANDO CC (+): PRETO
COMANDO CC (-): BRANCO

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PROJETO	Controlador de temperatura masterado			DESCRIÇÃO: INFORMAÇÕES	EQUIPAMENTO		SISTEMA DE CONTROLE	OBSERVAÇÃO:	
PROJETISTA	JANSSON VIDAL		26/03/2023		DESENHO Nº			REVISÃO:	PÁGINA: 3 / 14
RESPONSÁVEL			26/03/2023						
APROVAÇÃO									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

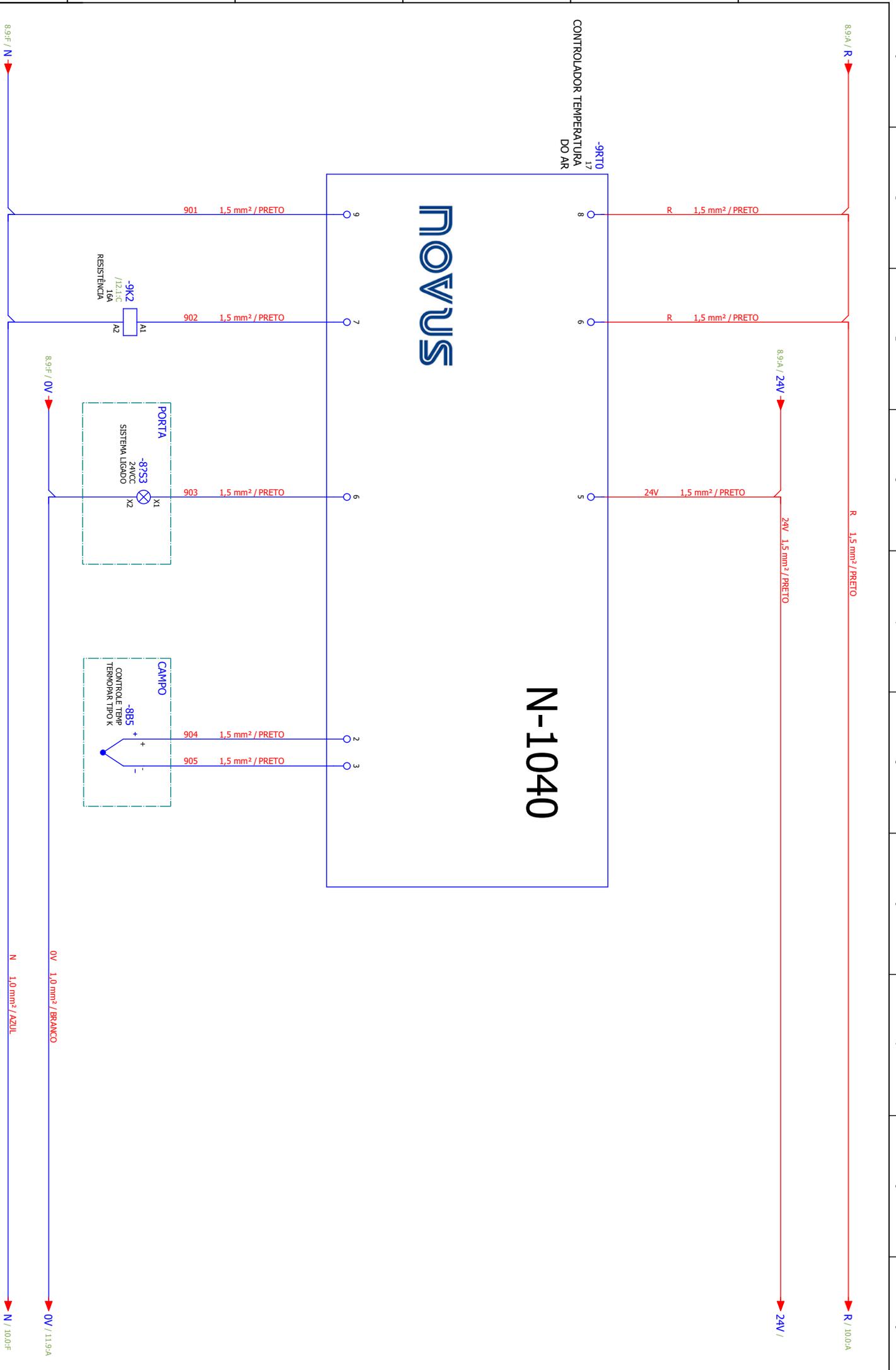


PROJETO	Controlador de temperatura masterado	
PROJETISTA	JANISSON VIDAL	26/03/2023
RESPONSÁVEL		26/03/2023
APROVAÇÃO		
0	1	2
3	4	5
6	7	8
9		

DESCRIÇÃO	ALIMENTAÇÃO DO PAINEL
EQUIPAMENTO	
DESENHO Nº	
SISTEMA DE CONTROLE	
OBSERVAÇÃO:	
REVISÃO:	
PÁGINA:	4 / 14



PROJETO	Controlador de temperatura maestro		26/03/2023		DESCRIÇÃO: BATERIA 12 VCC	EQUIPAMENTO		SISTEMA DE CONTROLE	OBSERVAÇÃO:
PROJETISTA	JANISSON VIDAL	26/03/2023	DESENHO Nº						
RESPONSÁVEL		26/03/2023							
APROVAÇÃO									



CONTROLADOR TEMPERATURA DO AR

N-1040

NOVOUS

PROJETO	Controlador de temperatura maestro		DESCRIÇÃO	Controlador N-1040		EQUIPAMENTO	SISTEMA DE CONTROLE		OBSERVAÇÃO:
PROJETISTA	JANSSON VIDAL		DATA	26/03/2023		DESENHO Nº			
RESPONSÁVEL			DATA	26/03/2023					
APROVAÇÃO									

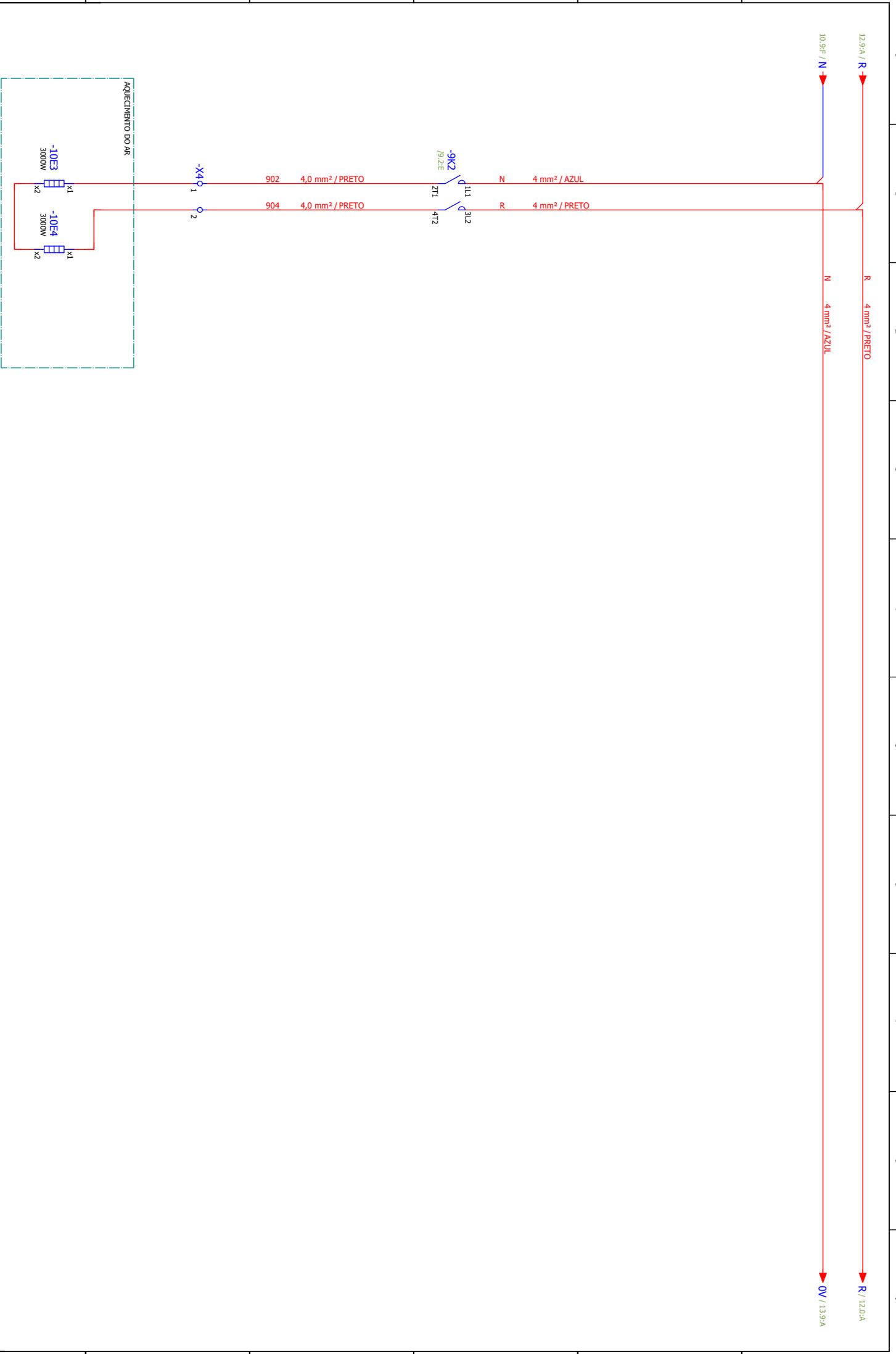
99A / R → 24V 1,0 mm² / VERMELHO → R / 119A

-8RS1
17
CONTROLADOR TEMPERATURA
DO REATOR

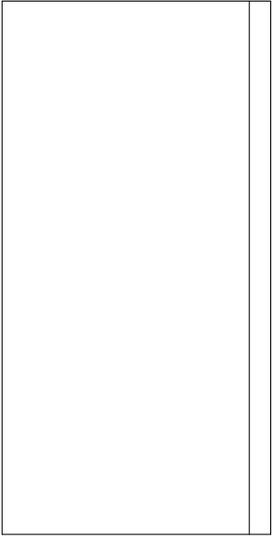
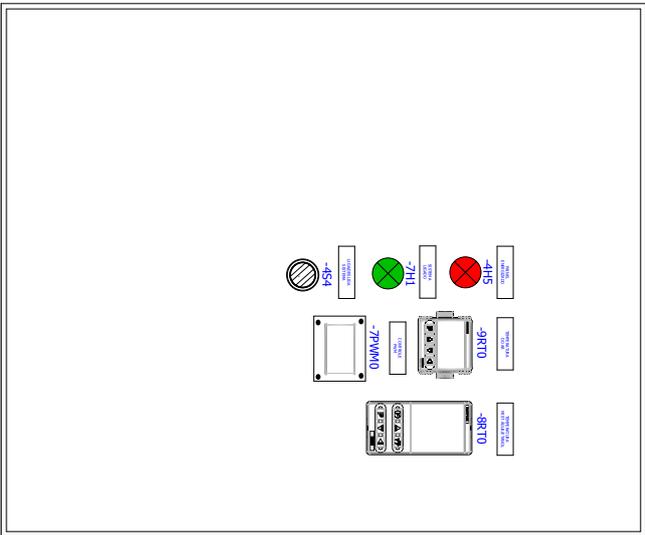
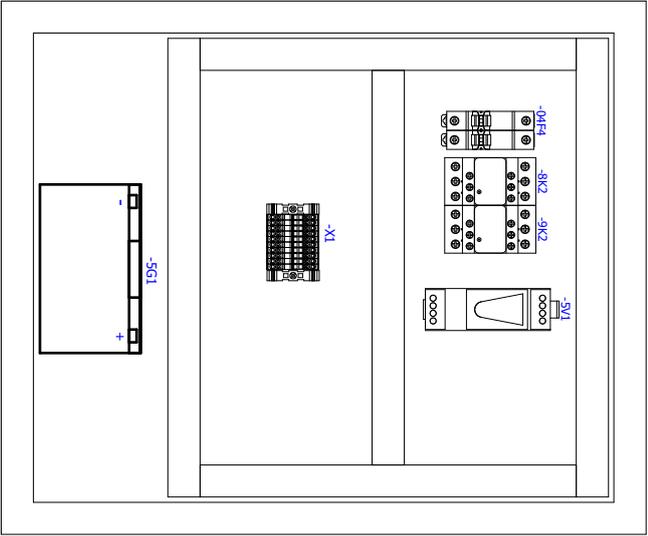


99F / N → N 1,5 mm² / AZUL → N / 120A

PROJETO	Controlador de temperatura maestro		DESCRIÇÃO	Controlador FE		EQUIPAMENTO	SISTEMA DE CONTROLE		OBSERVAÇÃO:		
PROJETISTA	JANSSON VIDAL		DATA	26/03/2023		DESENHO Nº			REVISÃO:		
RESPONSÁVEL			DATA	26/03/2023					PÁGINA:	10 / 14	
APROVAÇÃO											



PROJETO	Controlador de temperatura masterado			DESCRIÇÃO/AÇIONAMENTO AQUECIMENTO	EQUIPAMENTO	SISTEMA DE CONTROLE	OBSERVAÇÃO:
PROJETISTA	JANISSON VIDAL	26/03/2023			DESENHO Nº		
RESPONSÁVEL		26/03/2023					
APROVAÇÃO							



PROJETO	Controlador de temperatura mastrado		DESCRIÇÃO: VISTAS DO PAINEL		EQUIPAMENTO		SISTEMA DE CONTROLE		OBSERVAÇÃO:	
PROJETISTA	JANSSON VIDAL				DESENHO Nº				REVISÃO:	
RESPONSÁVEL	26/03/2023								PÁGINA: 14 / 14	
APROVAÇÃO	26/03/2023								9	

