

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

CEZAR JUNIOR VELHO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO
DE EMPUXO DE FORMA INDIRETA

Joinville
2019

CEZAR JUNIOR VELHO

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO
DE EMPUXO DE FORMA INDIRETA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, no curso Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Rafael
de Camargo Catapan

Joinville
2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais e meu irmão pelo incentivo em todas as etapas da minha vida.

À minha namorada Bruna Carolina Gielow que sempre esteve comigo.

Ao grupo de pesquisa do LAC pelo conhecimento compartilhado, companhia e experiência de vida.

À equipe Komos Foguetemodelismo, onde dediquei grande parte da graduação.

Ao meu orientador Rafael de Camargo Catapan por toda a orientação e suporte durante o tempo de iniciação científica e trabalho de conclusão de curso.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo de alguma forma, sendo na amizade, conquistas, projetos, lazer, desafios e trabalhos.

RESUMO

A miniaturização de componentes no setor aeroespacial tem sido amplamente estudada ao longo dos últimos. Satélites que apresentam massa entre 1 a 100 kg são chamados de *Nanosatellite/Microsatellite* e possuem requisitos exclusivos de propulsão, exigindo empuxos extremamente baixos e satisfazendo exigências de baixo consumo de energia, tamanho e custo de produção. Em consequência, a medição de empuxo de um micropropulsor é um desafio que surge no desenvolvimento de novas tecnologias de propulsão. Métodos diretos de medição de empuxo podem ser utilizados, no entanto, requerem que o propulsor seja construído de forma solidária aos sistemas de alimentação dos propelentes, dificultando os testes sistemático de alternativas de propulsores químicos. Em contrapartida, métodos indiretos têm sido usados por sua conveniência e relativa simplicidade. O objetivo desse trabalho é avaliar os parâmetros de desempenho propulsivos de um microreator catalítico no vácuo, para aplicação em micropropulsão, nanossatélites e microssatélites. A bancada consiste em uma câmara de vácuo, com sistema de alimentação dos reagentes, controle de temperatura e célula de carga. Os resultados experimentais foram comparado com modelo analítico no qual foi assumido escoamento isentrópico, sobre bocal convergente-divergente, e tubo com seção constante, para duas vazões volumétricas, utilizando ar como escoamento padrão. Resultados dos experimentos de empuxo médio utilizando reator catalítico com etanol como combustível apresentaram valores próximos a 2,5mN, o impulso específico ficou 92-139 s, para um bocal convergente-divergente, assumindo expansão ótima e com razão de área de saída com a garganta de 400.

Palavras-chave: Micropropulsor. Etanol. Medição Indireta. Vácuo.

ABSTRACT

Miniaturization of aerospace components has been extensively studied over the last few years. Satellites weighing between 1 and 100 kg are called Nanosatellites/Microsatellites and have unique propulsion requirements, with extremely low thrusts and low power consumption, size and production costs. As a result, measuring the thrust of a micro-thrust is a challenge that arises in the development of new propulsion technologies. Direct thrust measurement methods can be used, however, the thruster must be built in solidarity with the propellant feed systems, making systematic testing of alternative chemical thrusters difficult. In contrast, indirect methods have been used for their convenience and relative simplicity. The objective of this work is to evaluate the propulsive performance parameters of a catalytic microreactor in vacuum, for application in micropropulsion, nanosatellites and microsatellites. The bench consists of a vacuum chamber, with a reagent feeding system, temperature control and load cell. The experimental results were compared with an analytical model in which isentropic flow was assumed, within a convergent-divergent nozzle, and a tube with a constant section, for two volumetric flows, using air as standard flow. Results of the medium thrust experiments using a catalytic reactor with ethanol as fuel showed values close to 2.5mN, the specific thrust was 92-139 s, for a convergent-divergent nozzle, assuming optimal expansion and with an exit area ratio with a throat of 400.

Keywords: Micro-Propulsion. Ethanol. Indirect Measurement. Vacuum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conservação da massa.	13
Figura 2 – Conservação da energia.	14
Figura 3 – Motor foguete com um bocal convergente-divergente.	15
Figura 4 – Esquemático de motor foguete.	16
Figura 5 – Empuxo vs Impulso específico	17
Figura 6 – Comparação das reações sem e com o uso de catalisador.	19
Figura 7 – Fluxograma geral da metodologia adotada.	20
Figura 8 – Esquemático da bancada experimental.	21
Figura 9 – Esquema da câmara de vácuo.	21
Figura 10 – Vista em corte da câmara de vácuo.	22
Figura 11 – Componentes da flange detalha na tabela 2.	24
Figura 12 – Componentes da flange que suporta a célula de carga detalha na tabela 2	24
Figura 13 – Esquemático do sistema de aquecimento.	25
Figura 14 – Esquemático do sistema de aquisição de força.	27
Figura 15 – Esquemático do sistema de alimentação.	28
Figura 16 – Fluxograma do procedimento experimental.	30
Figura 17 – Representação da análise teórica	31
Figura 18 – Análise da distância axial para temperatura de 25 °C	32
Figura 19 – Análise da distância axial para temperatura de 50 °C	33
Figura 20 – Análise da distância axial para temperatura de 100 °C	34
Figura 21 – Análise da distância axial para temperatura de 150 °C	34
Figura 22 – Análise da distância axial para temperatura de 25 °C sem bocal	35
Figura 23 – Dados de temperatura do escoamento	37
Figura 24 – Dados de temperatura do escoamento	37
Figura 25 – Reator catalítico.	38
Figura 26 – Gráfico da razão de $A2/A^*$ para diferentes Mach.	39
Figura 27 – Imagem do bocal fabricado.	40
Figura 28 – Resultados de empuxo experimental utilizando etanol.	41
Figura 29 – Gráfico de impulso específico para etanol e ar.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do escoamento	17
Tabela 2 – Informações das flanges	23
Tabela 3 – Informações do sistema de aquecimento.	26
Tabela 4 – Informações do sistema de aquisição de força.	27
Tabela 5 – Informações do sistema de alimentação.	29
Tabela 6 – Propriedades utilizadas	36
Tabela 7 – Informações do bocal	39
Tabela 8 – Comparação entre trabalhos publicados	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

sc Superfície de controle

vc Volume de controle

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{m}	Vazão mássica
γ	Razão dos calores específicos
ρ	Densidade
a	Velocidade do som
A_1	Área da seção transversal da parte convergente do bocal
A_2	Área da seção transversal na saída bocal
A_i	Área da seção transversal
A_t	Área na garganta do bocal
F	Empuxo
g_0	Constante da gravidade
I_s	Impulso específico
M	Número de Mach
M_c	Massa molecular da mistura
P_1	Pressão na câmara de combustão
P_2	Pressão na ambiente
P_2	Pressão na saída do bocal
P_t	Pressão na garganta do bocal
R	Constante do gás
T_1	Temperatura na câmara de combustão
T_2	Temperatura na saída do bocal
u_2	Velocidade de jato na saída do bocal
v	Velocidade média relativa do objeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.1.1	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO TEÓRICA	13
2.1	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	13
2.1.1	Conservação da massa	13
2.1.2	Equação da quantidade de movimento linear	13
2.1.3	Lei da conservação de energia	14
2.2	PARÂMETROS DE DESEMPENHO AEROESPACIAL	14
2.2.1	Empuxo	14
2.2.2	Velocidade de jato	15
2.2.3	Impulso específico	16
2.2.4	Número de Mach	16
2.3	BOCAL IDEAL	17
2.4	CATÁLISE	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL	20
3.1.1	Câmara de vácuo	21
3.1.2	Sistema de aquecimento	25
3.1.3	Sistema de aquisição	26
3.1.4	Sistema de alimentação	28
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.3	CÁLCULO TEÓRICO	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	32
4.1.1	Análise da Distância Axial com bocal	32
4.1.2	Análise da Distância Axial sem bocal	35
4.1.3	Análise da Temperatura	36
4.2	FABRICAÇÃO DO BOCAL	37
4.3	RESULTADOS COM ETANOL	40
5	CONCLUSÕES	43
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44

REFERÊNCIAS	45
ANEXO A - FOLHA DE DADOS DO APLIFICADOR	47
ANEXO B - FOLHA DE DADOS DA CÉLULA DE CARGA	54
ANEXO C - DESENHO TÉCNICO DA CÂMARA DE VÁCUO	60

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do desenvolvimento e uso como ferramentas de aprendizagem em universidades, os CubSats foram desenvolvidos visando aplicações comerciais, militares e missões científicas. Segundo a empresa norte americana SpaceWorks Enterprise, projeções em planos anunciados e futuros desenvolvimentos do setor aeroespacial, indicam que quase 2.400 nanossatélites/microsatélites serão lançados até 2023 (DONCASTER et al., 2017).

O constante desenvolvimento no setor aeroespacial resultou na diminuição do tamanho físico de satélites combinado com o aumento da capacidade dos componentes usados em CubSat, e o baixo custo de desenvolvimento, construção e lançamento levou a propostas para missões mais exigentes (LEMMER, 2017). A demanda por CubSat levou à necessidade de sistemas de propulsão que exercessem empuxo na ordem de milinewton.

Em muitos casos, os sistemas de micropropulsão determinam a vida útil e desempenho dos satélites. Dentre os sistemas micropropulsivos disponíveis comercialmente, tais como, elétricos, gás frio e quente, propelentes sólidos, monopropelentes e bipropelentes líquidos, são utilizados em correções periódicas ou contínuas e manobras orbitais (YAO et al., 2015).

Correções periódicas ou contínuas são utilizadas na micropropulsão devido às perturbações que podem ocorrer graças aos efeitos de pressão de radiação solar e da não-uniformidade gravitacional (HITT et al., 2001). Neste contexto, a medição de empuxo em micropropulsor é um dos novos desafios que surgem no desenvolvimento de novas tecnologias para propulsão.

A força exercida do escoamento acelerado ao longo de um bocal convergente-divergente devido à combustão geralmente é medido por método direto. O propulsor é projetado de forma solidária à um sistema de medição de força, especificado para a faixa de empuxo necessário. No entanto, a utilização do método direto deixa de ser prático quando se trata de micro e nanopropulsão, pois as instalações experimentais se tornam complexas, dificultando os testes e influenciando na medição do empuxo (WU et al., 2011).

Por outro lado, método indireto tem sido utilizado para medir o empuxo de um jato de gás, líquido ou plasma, por sua relativa facilidade e conveniência, evitando instalações experimentais complexa, que dificulta os testes e influencia na medição do empuxo. (PATEL et al., 2008). As partículas resultantes da combustão são aceleradas

ao longo do bocal, que colidem com anteparo, obtendo a força de empuxo a partir do escoamento e por esse motivo, o método possui erro (CHAVERS et al., 2006).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os parâmetros de desempenho propulsivos de um microreator catalítico no vácuo, para aplicações em micropropulsão, nanossatélites e microssatélites.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Projetar uma bancada experimental para as análises dos parâmetros aeroespaciais;
- b. Projetar e construir um bocal;
- c. Realizar experimentos para aquisição de dados de desempenho;
- d. Comparar os resultados experimentais com a teoria de escoamento isentrópico e resultados da literatura.

2 REVISÃO TEÓRICA

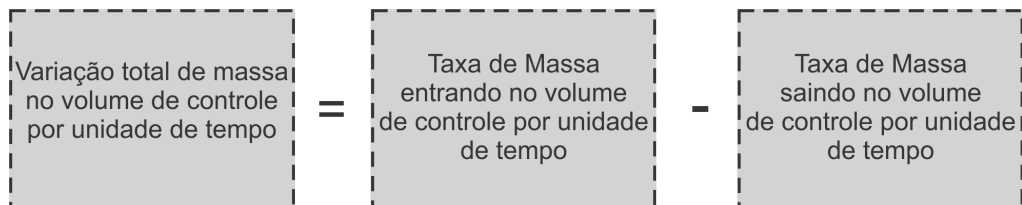
Neste capítulo se apresentam os principais conceitos básicos de propulsão de foguetes e parâmetros de performance aeroespacial, que foram utilizados para quantificar o microreator.

2.1 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

2.1.1 Conservação da massa

O princípio da conservação de massa no sistema é aquele em que a massa permanece constante, representando no esquemático da Figura 1. A soma do fluxo de massa que entra no volume de controle, menos o que sai é zero e sua formulação é dada na Equação 1 (FOX et al., 2000).

Figura 1 – Conservação da massa.



Fonte: Adaptado de (WARD, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho d\mathcal{V} + \int_{sc} \rho \vec{V} dA = 0 \quad (1)$$

2.1.2 Equação da quantidade de movimento linear

Aplicando a segunda lei de Newton, Equação 2, em um volume de controle, onde as coordenadas cartesianas são fixas, tem-se:

$$\vec{F} = \left(\frac{d\vec{P}}{dt} \right)_{sistema} \quad (2)$$

$$\left(\frac{d\vec{P}}{dt} \right)_{sistema} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho \vec{V} d\mathcal{V} + \int_{sc} \vec{V} (\rho \vec{V}) d\vec{A} \quad (3)$$

As Equações 2 e 3, podem ser combinadas, onde a força resultante \vec{F} , inclui as forças de campo e superfície, que atuam no sistema. Assim, a formulação para

quantidade de movimento é dada pela Equação 4 (FOX et al., 2000)

$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho \vec{V} dV + \int_{sc} \vec{V} (\rho \vec{V}) d\vec{A} \quad (4)$$

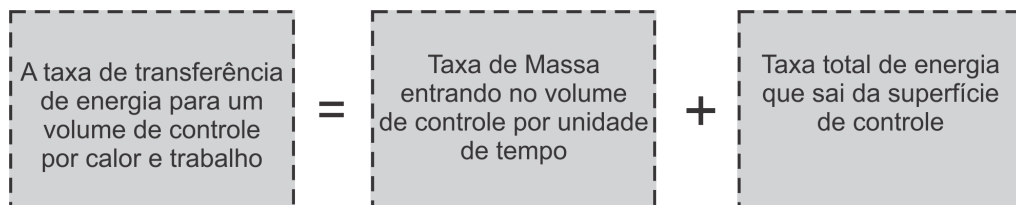
O primeiro termo da integral na Equação 4, representa a taxa de variação da quantidade de movimento dentro volume de controle. O segundo termo é a taxa líquida de movimento que sai do volume de controle, através da superfície de controle (WARD, 2010).

2.1.3 Lei da conservação de energia

A primeira lei da termodinâmica representa a conservação da energia em um volume de controle que encontra-se estacionário em relação ao sistema de coordenadas cartesianas. O conceito é expressado na Figura 2 e sua formulação a Equação 5, sendo \dot{Q} e \dot{W} a taxa de transferência de calor e trabalho, respectivamente. O termo e representa a energia potencial e cinética (FOX et al., 2000).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} e \rho dV + \int_{sc} e \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

Figura 2 – Conservação da energia.



Fonte: Adaptado de (WARD, 2010).

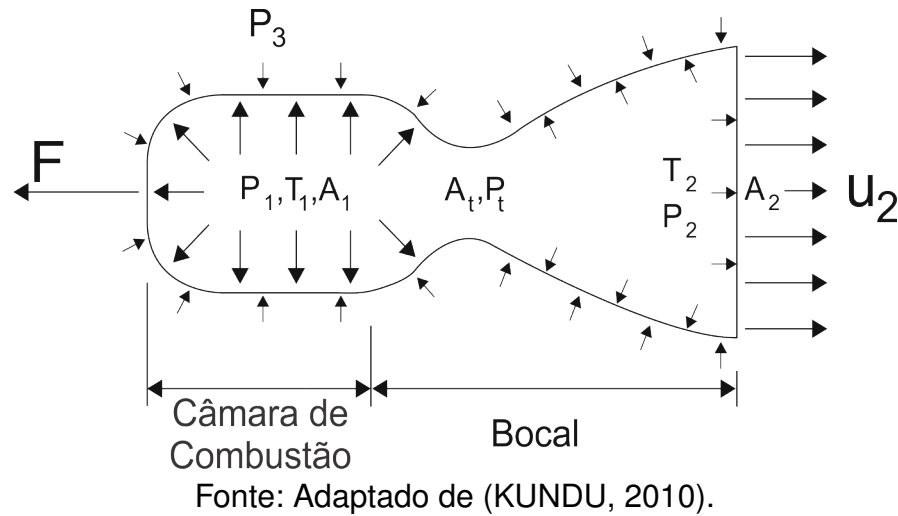
2.2 PARÂMETROS DE DESEMPENHO AEROESPACIAL

2.2.1 Empuxo

O conceito de empuxo pode ser relacionado a um simples balão cheio de ar. Quando seu orifício é aberto, o ar tende a sair em alta velocidade, fazendo uma força na direção axial, chamada de empuxo (F). No caso de sistemas propulsivos de foguetes, os gases gerados devido a queima de combustível e oxidante na câmara de combustão, saem em alta velocidade gerando o empuxo, sendo influenciada pela pressão (KUNDU, 2010).

Dentro da câmara de combustão a pressão é maior que a externa (ambiente), na Figura 3 os vetores indicam a direção da força de pressão. Os subíndices 1, t e 2 referem-se às áreas, pressões e temperaturas estáticas na entrada, garganta e saída do bocal, respectivamente, o subíndice 3 refere-se a condição ambiente (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

Figura 3 – Motor foguete com um bocal convergente-divergente.



A força de empuxo para um motor foguete é obtida através quantidade de movimento linear, assumindo hipóteses de regime permanente, bocal unidimensional, uniforme e desprezando as forças de corpo. A Equação 4 resulta na Equação 6, considerando que a vazão mássica (\dot{m}) é constante e todo combustível e oxidante é consumido na câmara de combustão (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

$$\sum F = \int_{sc} \rho \vec{V}(\vec{V}) d\vec{A} = \dot{m}u_2 \quad (6)$$

Somando as forças de pressão que atuam na Figura 3 e juntado com a Equação 6 obtém-se a formulação para o empuxo, Equação 7. A velocidade (u_2) é uniforme, P é a pressão e A_2 área da seção transversal na saída do bocal. Assumindo que não há onda de choque ($p_2 = p_3$), e escoamento totalmente expandido na saída do bocal, resultando na Equação 8 (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

$$F = \dot{m}u_2 + (p_2 - p_3)A_2 \quad (7)$$

$$F = \dot{m}u_2 \quad (8)$$

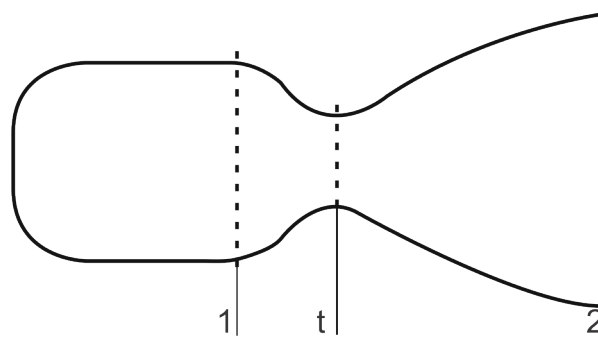
2.2.2 Velocidade de jato

O combustível e oxidante são injetados na câmara de combustão, entrando em ignição, logo em seguida. Os produtos gerados da reação química liberam energia na forma de calor em altas temperaturas e pressões. Esses gases se expandem através do bocal convergente-divergente, alcançando altas velocidades (EL-SAYED, 2016).

Aplicando a primeira lei da termodinâmica, Equação 5, entre as seções 1 e 2, câmara de combustão e seção de saída do bocal, da Figura 4, assumindo hipóteses

de regime permanente, não há efeito de energia potencial, escoamento isentrópico e apenas na direção axial, chega-se na Equação 9 para velocidade de jato do bocal convergente-divergente (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

Figura 4 – Esquemático de motor foguete.



Fonte: Adaptado de (KUNDU, 2010).

$$u_2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{RT_1}{M_c} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (9)$$

2.2.3 Impulso específico

O impulso específico é um parâmetro que utiliza o impulso total por unidade de peso do propelente, sendo possível comparar vários sistemas de propulsão existentes, como por exemplo, gás frio, propulsão elétrica e química. O parâmetro é muito similar ao consumo de automóveis, quilômetros por litro, sendo que um número maior significa melhor desempenho. A Figura 5 apresenta alguns sistemas de micropropulsão disponíveis comercialmente. (SUTTON; BIBLARZ, 2016). Considerando que o fluxo de massa expelido através do bocal é constante, a Equação 10 pode ser simplificada. O resultado é a razão do empuxo (F) por fluxo de massa (\dot{m}) multiplicado a constante de gravidade (g_0), Equação 11 (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

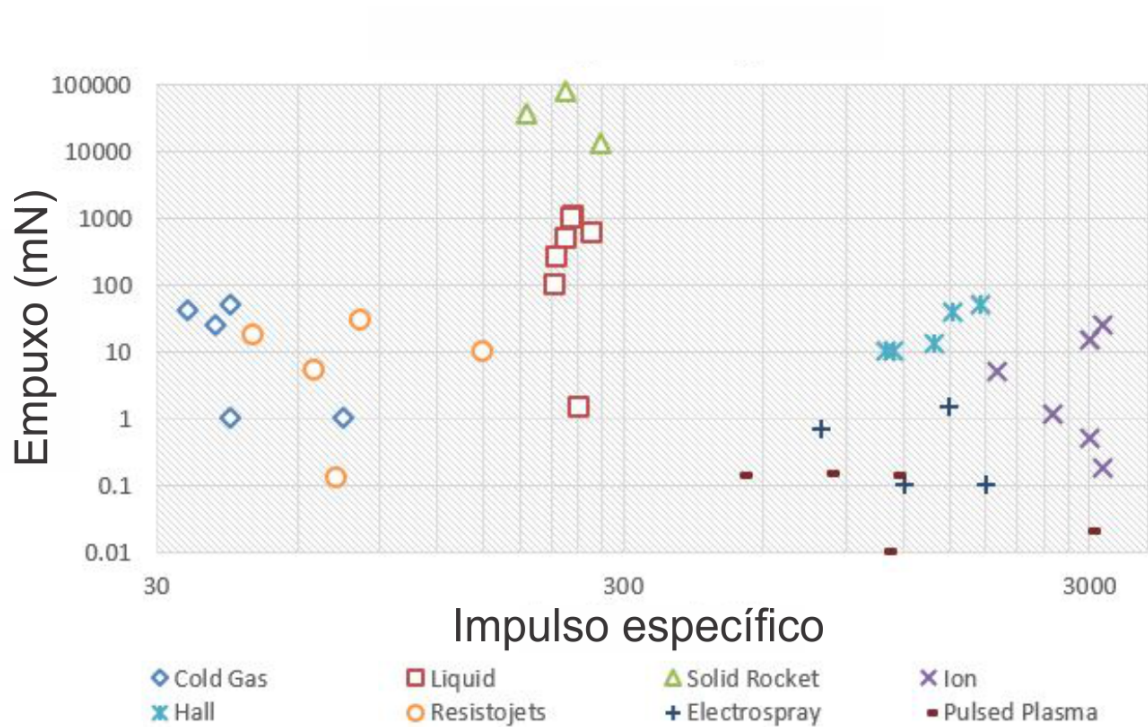
$$I_s = \frac{\int_0^t F dt}{g_0 \int \dot{m} dt} \quad (10)$$

$$I_s = \frac{F}{\dot{m} g_0} \quad (11)$$

2.2.4 Número de Mach

O número de Mach é a velocidade do escoamento (v), dividida pela velocidade do som (a), Equação 12, sendo um parâmetro adimensional. A velocidade do som é definida na Equação 13. A Tabela 1 apresenta os regimes do escoamento para

Figura 5 – Empuxo vs Impulso específico



Fonte: Adaptado de (TUMMALA; DUTTA, 2017).

diferentes números de Mach (ANDERSON, 1990).

$$M = \frac{v}{a} \quad (12)$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (13)$$

Tabela 1 – Classificação do escoamento

Regime	Subsônica	Transônica	Supersônica	Hipersônica
Mach	< 0,8	0,8-1,3	1,3-5	5 >

2.3 BOCAL IDEAL

No dimensionamento de bocal foram adotadas hipóteses simplificadoras que descrevem soluções úteis partindo das equações da conservação de massa, momento e energia, para fluxo isentrópico, sendo possível o cálculo do número de Mach, áreas e diâmetros de garganta e saída. As simplificações adotadas para um fluxo quase-unidimensional encontram-se abaixo:

- Escoamento puramente isentrópico;
- Gás caloricamente perfeito;

- c. Não ocorre ondas de choque no bocal;
- d. Efeito de atrito e camada limite é desprezado.

A vazão mássica tem fluxo constante, todo propelente consumido na câmara de combustão tem que passar pelo bocal, seção 1 e sair na seção 2 da Figura 4. A pressão diminui ao longo do bocal, a densidade é elevada na garganta e diminui para um valor baixo no plano de saída. A velocidade, por outro lado aumenta, atingindo regime sônico na garganta e $Mach > 1$ na saída (TURNER, 2008).

Definindo a velocidade de jato, a diferença de pressão entre a câmara de combustão e a de saída do bocal, juntamente com a área da seção transversal do bocal, determinará a vazão mássica. A Equação 14 fornece o fluxo de massa através do bocal de foguete, portanto, proporcional à área da garganta (A_t), pressão (P_1) e temperatura (T_1) da câmara de combustão, e das propriedades do gás de combustão (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

$$\dot{m} = \frac{P_1 A_t}{\sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (14)$$

A Equação 15 relaciona o número de Mach com as pressões na câmara de combustão e na garganta, obtendo a razão das pressões, é possível encontrar o valor de Mach, e assim no caso inverso.

$$M_2 = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_t} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (15)$$

A relação da área de expansão para um bocal com escoamento isentrópico, Equação 16, pode ser expressa em termos da razão da pressão de saída, e pressão na câmara de combustão, e razão dos calores específico, para qualquer ponto dentro do bocal, admitindo que na garganta da Figura 4, o fluxo é sônico (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

$$\frac{A}{A_t} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{1}{\gamma + 1} \right) \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (16)$$

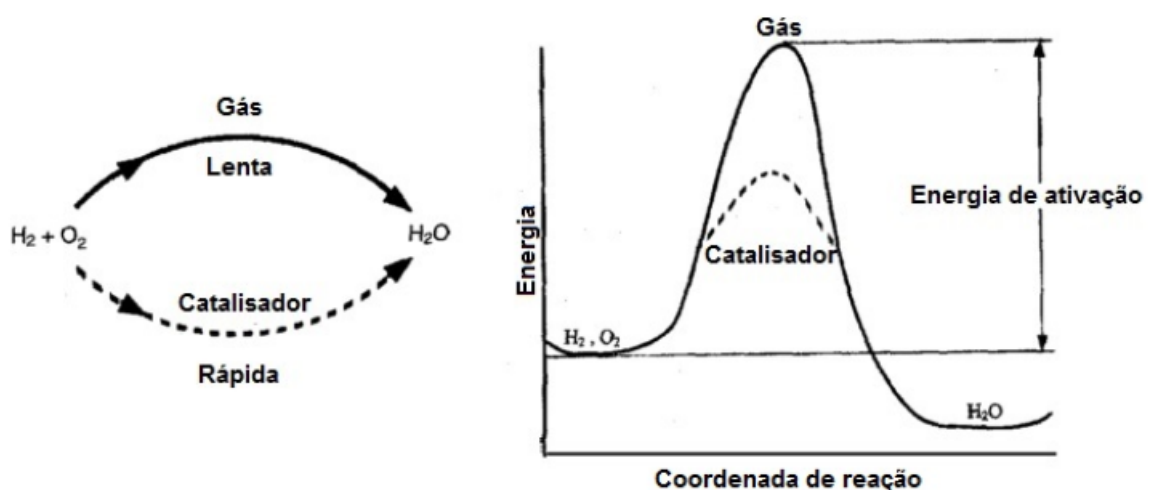
2.4 CATÁLISE

Um problema na área de combustão é a extinção de chamas. Há muitos fatores que influenciam a extinção de uma chama. Por exemplo, tipo de combustível, da concentração da mistura, direção da propagação da chama, sendo o principal a extinção em canais ou fendas estreitas. A miniaturização de componentes do sistema de propulsão de satélites, como a câmara de combustão, leva à intensificação da transferência de calor, o que pode ocasionar a extinção da chama devido ao aumento substancial da razão área/volume, dificultando a propagação da chama na fase gasosa (TURNS, 2013).

A catálise tem alta relevância em função das inúmeras aplicações na indústria química, petroquímica, energia, sustentável e meio ambiente, e desenvolvimento de novos materiais. Catalisadores são substâncias que não participam da reação química, não alteram a composição dos reagentes e produtos, afetam a velocidade, em que uma reação ocorre, tanto para acelerar quanto desacelerar (SCOTT, 2016).

As reações catalíticas podem ocorrer de duas formas, homogêneas ou heterogêneas e a diferença está no número de fases das substâncias e catalisador envolvidos. Desta forma, um catalisador como platina (Pt), paládio (Pd) ou ródio (Rh), quando depositado sobre a parede interna de uma câmara de combustão, pode superar essas barreiras, reduzindo a energia de ativação e permitindo que reações ocorram em temperaturas mais baixas, conforme a Figura 6 (SCOTT, 2016; TURNS, 2013; COELHO, 2018)

Figura 6 – Comparação das reações sem e com o uso de catalisador.

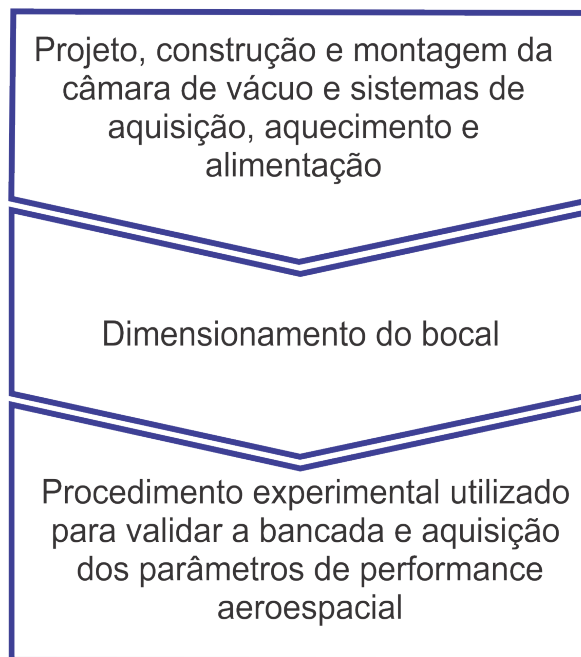


Fonte: (SCOTT, 2016).

3 METODOLOGIA

A metodologia apresentada na Figura 7, consiste em uma parcela experimental e outra teórica. Primeiramente, foi realizado um estudo para o projeto do bocal e da bancada experimental com suas devidas especificações no vácuo. Então, foi realizado a construção da bancada e validação, assim como a realização do experimento. Este projeto foi realizado no Laboratório de Combustão e Catálise Aplicados - LAC, na Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville.

Figura 7 – Fluxograma geral da metodologia adotada.

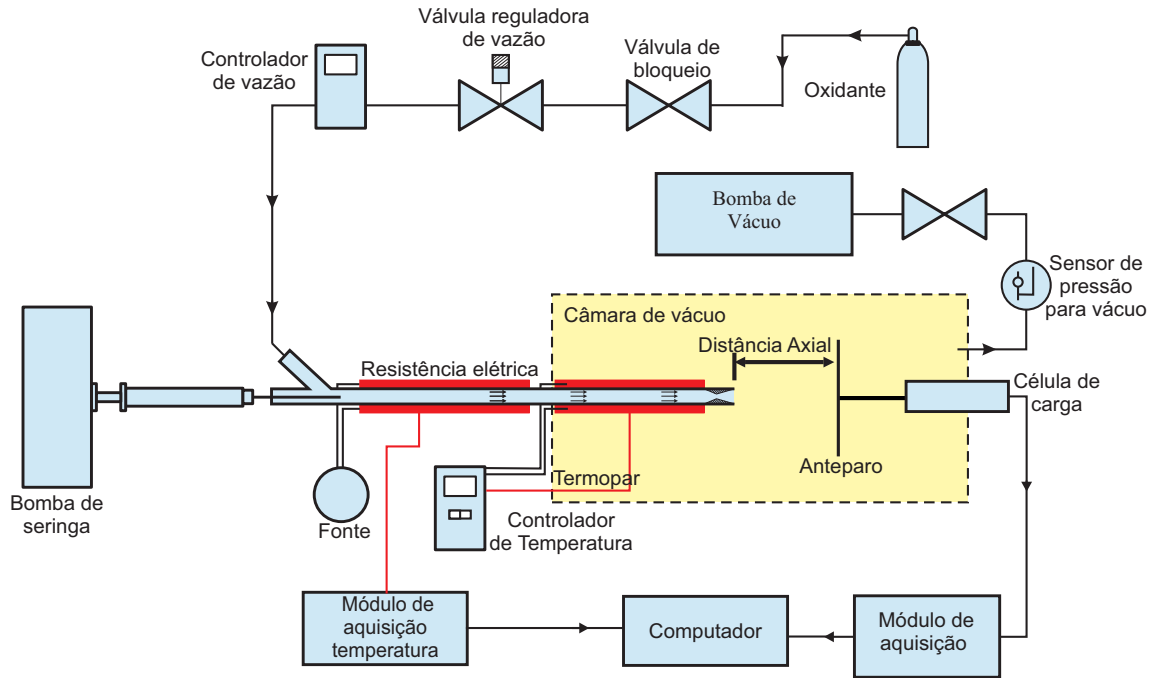


Fonte: Autor (2019)

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A Figura 8 é uma representação completa da bancada experimental, nela contém a câmara de vácuo, sistemas de alimentação dos reagentes, aquecimento, para gerar o vácuo e aquisição dados de força e temperatura. Nessa etapa, cada parte da bancada será detalhada.

Figura 8 – Esquemático da bancada experimental.

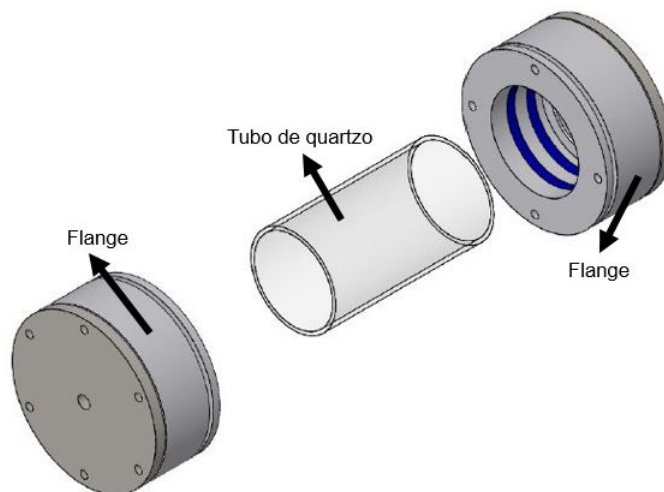


Fonte: Autor (2019)

3.1.1 Câmara de vácuo

Os equipamentos utilizados na medição de empuxo são altamente sensíveis, sujeitos a captar oscilações do ambiente, que interferem nos resultados. Devido à baixa intensidade das vazões de oxidante e combustível, usadas nos testes, foi projetada uma câmara de vácuo especificamente para esse experimento (VELHO, 2017).

Figura 9 – Esquema da câmara de vácuo.



Fonte: Autor (2019).

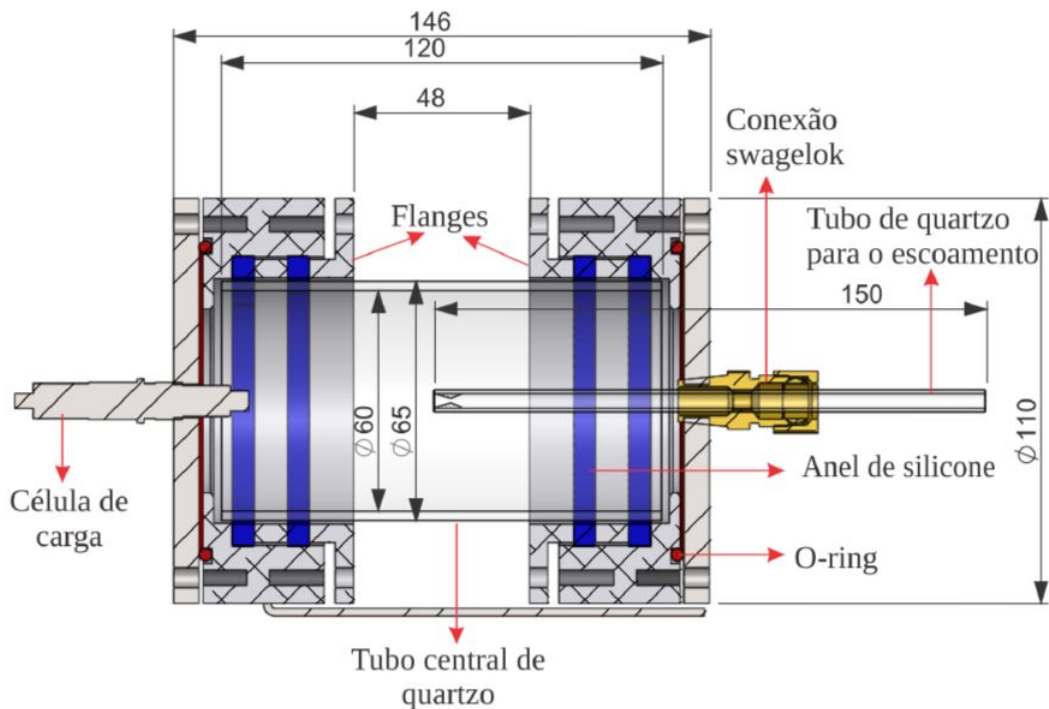
O esquema da câmara de vácuo, Figura 9, foi pensado de modo que

conseguisse alocar os equipamentos, como célula de carga com anteparo, tubo de quartzo com reator, canal para a bomba de seringa e oxidante, conexão para bomba de vácuo, resistência elétrica e termopares. E ainda teria que resistir a temperatura mantendo o vácuo (VELHO, 2017).

A Figura 10 apresenta uma vista em corte do projeto da câmara de vácuo, equipada com célula de carga e com abertura para inserção do tubo de quartzo, sendo possível alocar o micro reator catalítico, assim como a inserção do combustível e oxidante. A tabela 2 apresenta uma breve descrição dos componentes responsáveis pela vedação da câmara de vácuo.

Para inserir o tubo de quartzo com 150 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro externo, foi colocada uma conexão anilhada e um o-ring nesse segmento, preenchendo o espaço entre o tubo e a conexão quando apertado, não deixando perder o vácuo. Outros dois o-rings foram inseridos entre as aberturas em que foram colocados a célula de carga e o tubo de quartzo para o escoamento.

Figura 10 – Vista em corte da câmara de vácuo.



Fonte: Autor (2019).

A conexão swagelok (2) da Figura 11, foi um meio pensando de vedar o tubo de quartzo, que passa o escoamento. Utilizando três o-rings (1), com medidas diferentes em sequência na rosca fêmea swagelok, que quando apertada faz a vedação, assegurando que fique preso e seguro.

A tampa da flange (4), tem a função de suporte do item (2) e , e suas peças, quando os parafusos M5 (13) são apertados, fazendo pressão no o-ring, item três da

Tabela 2 – Informações das flanges

Item	Qtd	Descrição	Material
1	3	O-rings $\varnothing(7 \times 10,7)$ mm, $\varnothing(6 \times 9,5)$ mm, $\varnothing(5 \times 8,2)$ mm	Silicone
2	1	Conexão swagelok de passagem reta 1/4 pol.	Cobre
3	1	O-ring $\varnothing(77 \times 83,6)$ mm	Silicone
4	1	Tampa da flange	Alumínio
5	1	Corpo principal da flange	Alumínio
6	1	Anel de aperto ($9 \times \varnothing 67,2 \times \varnothing 76$) mm	Alumínio
7	2	O-ring ($6 \times \varnothing 65 \times \varnothing 77$) mm	Silicone
8	1	Tampa de aperto para fazer a vedação	Alumínio
9	1	O-ring ($\varnothing 62 \times 67$) mm	Silicone
10	1	conexão swagelok de passagem reta	Cobre
11	1	Conexão engate rápido reta, macho PC 6x1/4	Aço inoxidável
12	4	Parafuso Allen M6 sextavado interno	Aço inoxidável
13	6	Parafuso Allen M5 sextavado interno	Aço inoxidável
14	1	Célula de carga piezoelétrica	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

tabela 2, isolando a entrada e saída de ar.

A vedação do tubo central de quartzo, da Figura 10, é realizada por dois o-rings (7), separados por um anel (6), a descrição dos itens é apresentada na tabela 2. Quando os parafusos, item (11), da tampa de aperto (8), são fixados e parafusados, é aplicada força nos o-rings entre o anel, e se expande, na parede do corpo principal da flange (5), e no tubo central da Figura 9, assim vedando.

Quando ligado a bomba de vácuo o tubo central de quartzo acaba retraindo, puxado no sentido da sucção do ar. Para evitar o contato com alumínio, impedindo trincas e danos, foi adicionado outro o-ring, item 9 da Figura 9.

A câmara de vácuo é formada por duas flanges, que vedam os lados do tubo central de quartzo, a diferença entre elas está na tampa da flange. Na Figura 12, o item 11 da tabela 2 é uma conexão de engate rápido pneumática do tubo, que é ligado na bomba de vácuo. Uma saída swagelok foi deixada, com função de passar os cabos da resistência elétrica e termopares, para selar qualquer fuga de ar, foi aplicado silicone para alta temperatura. O item 14 da Figura 12 é o sensor de força.

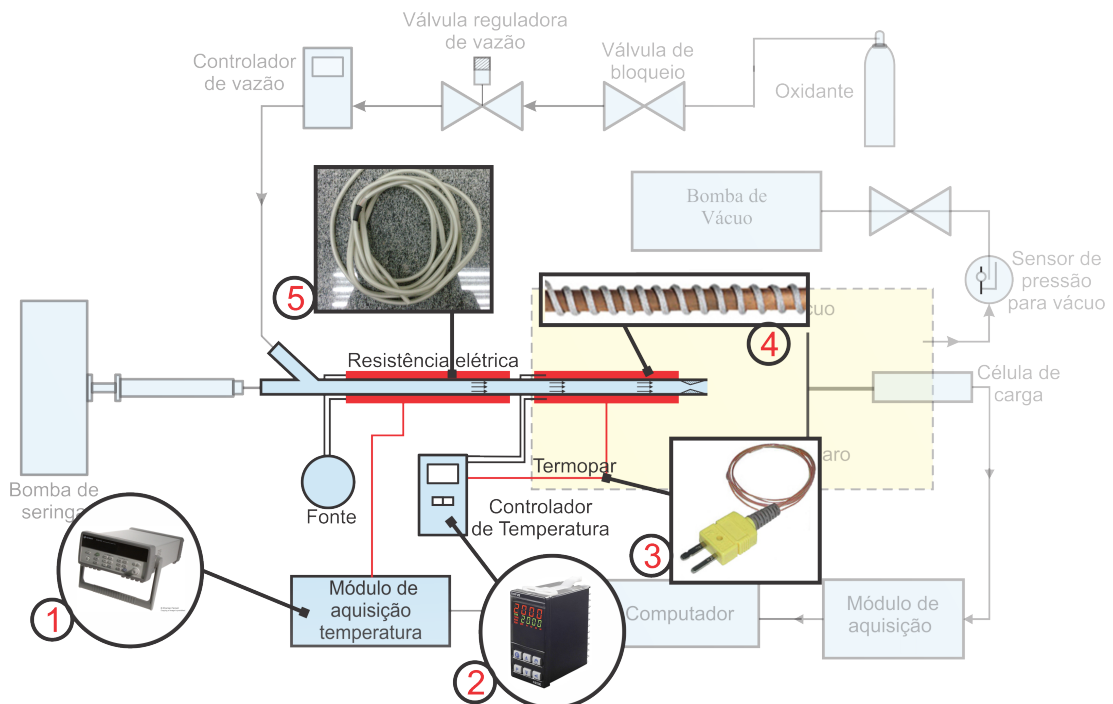
3.1.2 Sistema de aquecimento

A Figura 13 é uma representação esquemática do sistema de aquecimento, instalado na bancada. Os itens da Figura 13, são descritos na tabela 3, apresentando as informações relevantes dos equipamentos utilizados no sistema de aquecimento da bancada.

O tubo de quartzo por onde passa o escoamento é revestido com duas resistências, uma fica dentro da câmara de vácuo (4), a outra é posicionada fora da câmara, à pressão ambiente (5). Ambas são revestidas com manta de fibra de vidro, mantendo isolado as resistências, evitando aquecimento de outros componentes e troca de calor com o ambiente.

O modelo Rope Heaters FGR-030 (4) utiliza um controlador de temperatura N2000 (2), possui um termopar tipo K (3) ligado ao equipamento e resistência, para fazer o controle da temperatura de operação. A resistência flexível da fabricante tesla (5), é ligada direta em uma fonte 220 Volts, trabalhando próximo da temperatura máxima.

Figura 13 – Esquemático do sistema de aquecimento.



Fonte: Autor (2019).

O Datalogger Agilent 34970A (1), faz aquisição da temperatura, um termopar conectado a resistência flexível e outro dentro do tubo por onde passa o escoamento. O equipamento fornece os dados de temperatura na forma de gráfico, no programa fornecido pela empresa.

Tabela 3 – Informações do sistema de aquecimento.

Item	Qtd	Descrição	Fabricante
1	1	Equipamento Datalogger 34970A, para aquisição de temperatura com 25 canais.	Agilent
2	1	Controlador de temperatura N2000, sistema PID.	NOVUS
3	3	Termopar tipo K, isolados com Kapton.	OMEGA
4	1	Resistência elétrica tipo traço, Rope Heaters FGR-030, flexível com isolamento em fibra de vidro, temperatura máxima de operação 482 °C e 125 Watts.	OMEGA
5	1	Resistência elétrica flexível em silicone, formada por dois condutores desencapados alternadamente em intervalos regulares, temperatura de operação 200 °C e 50 W/m.	Tesla Compl.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

3.1.3 Sistema de aquisição

A Figura 14 é uma representação do sistema montado para obter os dados de empuxo. O anteparo utilizado tem a função de receber o escoamento derivado da tubeira, o anteparo é preso em um parafuso M3, que está conectado na célula de carga, que possui rosca M3 fêmea, na ponta do seu sensor de força.

O sinal captado da célula de carga, é enviado para módulo de aquisição ou amplificador, o sinal é transmitido por meio de um cabo, especial para sensores piezoelétricos, e também por possuir faixa de carga e frequência extremamente ampla.

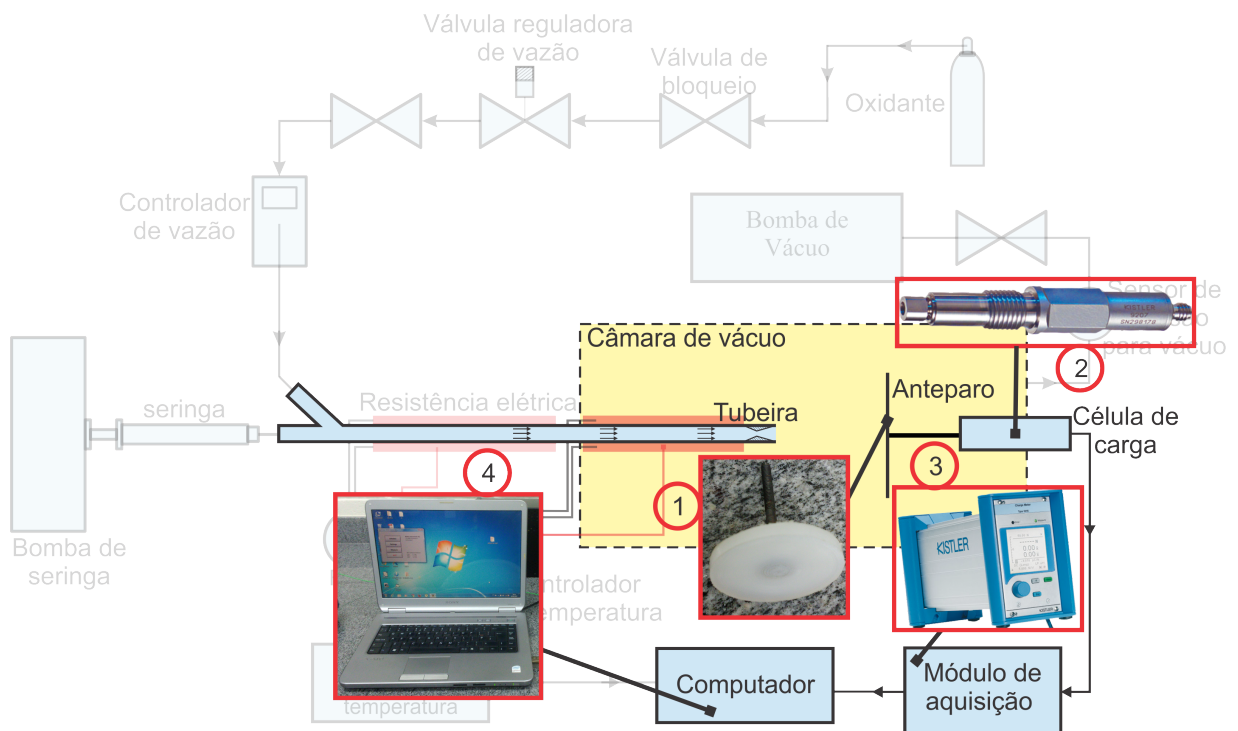
O amplificador tem a função de amplificar o sinal e transmitir para o usuário, que pode interpretar em seu visor. Ao conectar o amplificador a um computador, por meio de um cabo serial, é possível adquirir os dados. O módulo de aquisição é acompanhado com um programa fornecido pelo fabricante.

Tabela 4 – Informações do sistema de aquisição de força.

Item	Qtd	Descrição	Fabricante
1	1	Anteparo com 60 milímetros de diâmetro, produzido em nylon	Autor
2	1	Célula de carga piezoelétrica, sensor para pequenas forças, modelo 9207	Kistler
3	1	Amplificador de carga de laboratório, adequado para aplicações genéricas de medição com sensores piezoelétricos no ambiente de laboratório, modelo 5015A	Kistler
4	1	Notebook com sistema operacional windows	SONY
5	1	Cabo serial RS-232C	Autor
6	1	Conexão KIAG 10-32UNF de fibra ótica	Kistler

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 14 – Esquemático do sistema de aquisição de força.

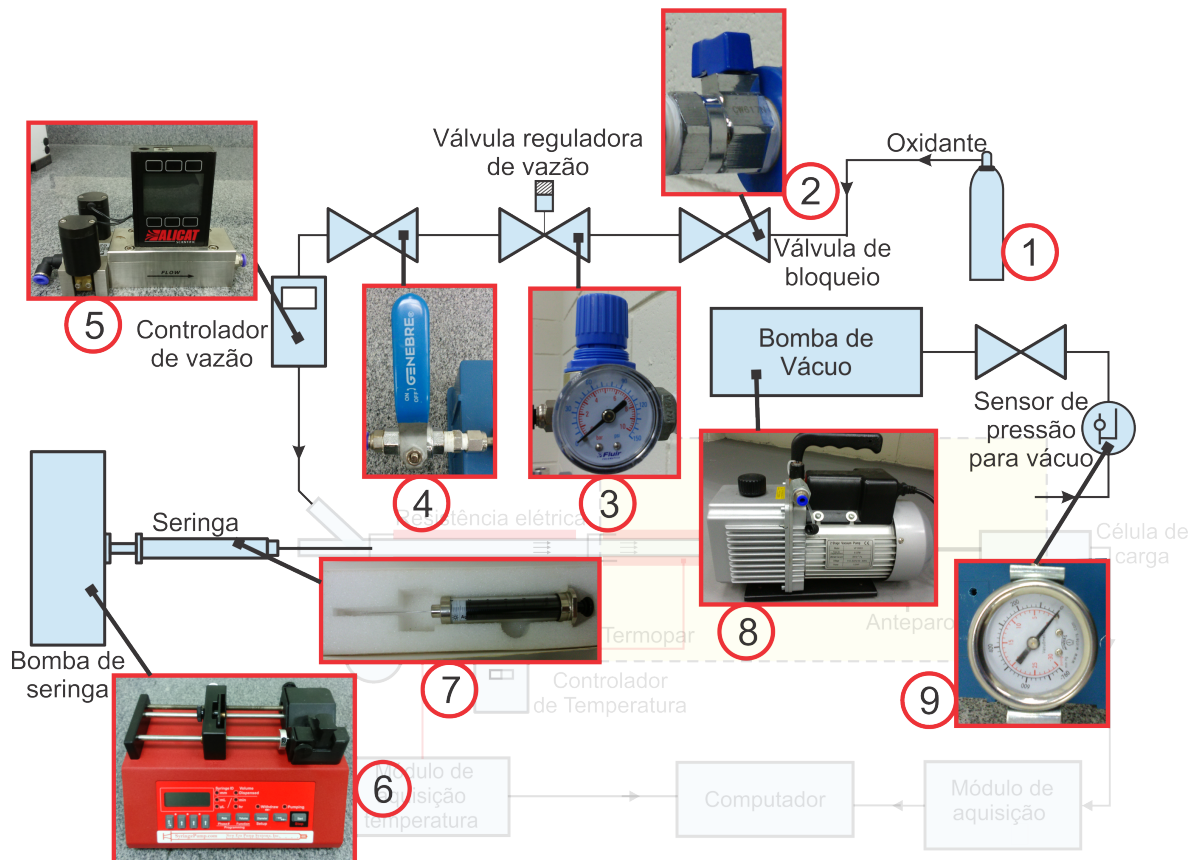


Fonte: Autor (2019).

3.1.4 Sistema de alimentação

A Figura 15 representa o esquemático do sistema de alimentação da bancada. O oxidante, item 1, é fornecido por uma linha de ar alimentado por um compressor. A válvula de bloqueio, tem a função de abre e fecha, a válvula reguladora de vazão ajusta a pressão desejada e possui uma saída de conexão engate rápido, ambas fazem parte da linha pressurizada, sendo conectadas uma na outra.

Figura 15 – Esquemático do sistema de alimentação.



Fonte: Autor (2019).

Na figura 15, o controle do fluxo de oxidante, foi utilizado um controlador de vazão, mássica ou volumétrica, e uma válvula de bloqueio. O controle do fornecimento de combustível, foi utilizada uma bomba de infusão e uma seringa. Para fazer o vácuo na câmara, foi utilizado uma bomba de vácuo, um sensor de pressão analógico para monitorar o vácuo realizado, e uma válvula de bloqueio.

Tabela 5 – Informações do sistema de alimentação.

Item	Qtd	Descrição	Fabricante
1	1	Compressor Twister Bravo Csl 10/100, 2 hp, 140 libras de pressão	Schulz SA
2	1	Registro esfera mini macho/Fêmea, com rosca 1/2	Fluir Automação
3	1	Válvula reguladora de pressão, rosca 1/2	Fluir Automação
4	2	Válvula esfera fêmea com rosca 1/4, função abre e fecha	GENEBRE
5	1	Controlador de vazão, modelo da série M 0-10 SLPM	ALICAT scientific
5	1	Controlador de vazão, modelo da série M 0-100 SLPM	ALICAT scientific
6	1	Bomba de infusão modelo NE-1000	New Era Pump Systems Inc.
7	1	Seringa com volume de 10 mL e diâmetro interno de 14,1 mm	Agilent
8	1	Bomba de vácuo 1/2 hp, modelo VP-260D, vácuo máximo de 3e-1 Pa	CULMI
9	1	Manômetro analógico para utilizar no vácuo, -760 mmHg	Winters Instruments

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

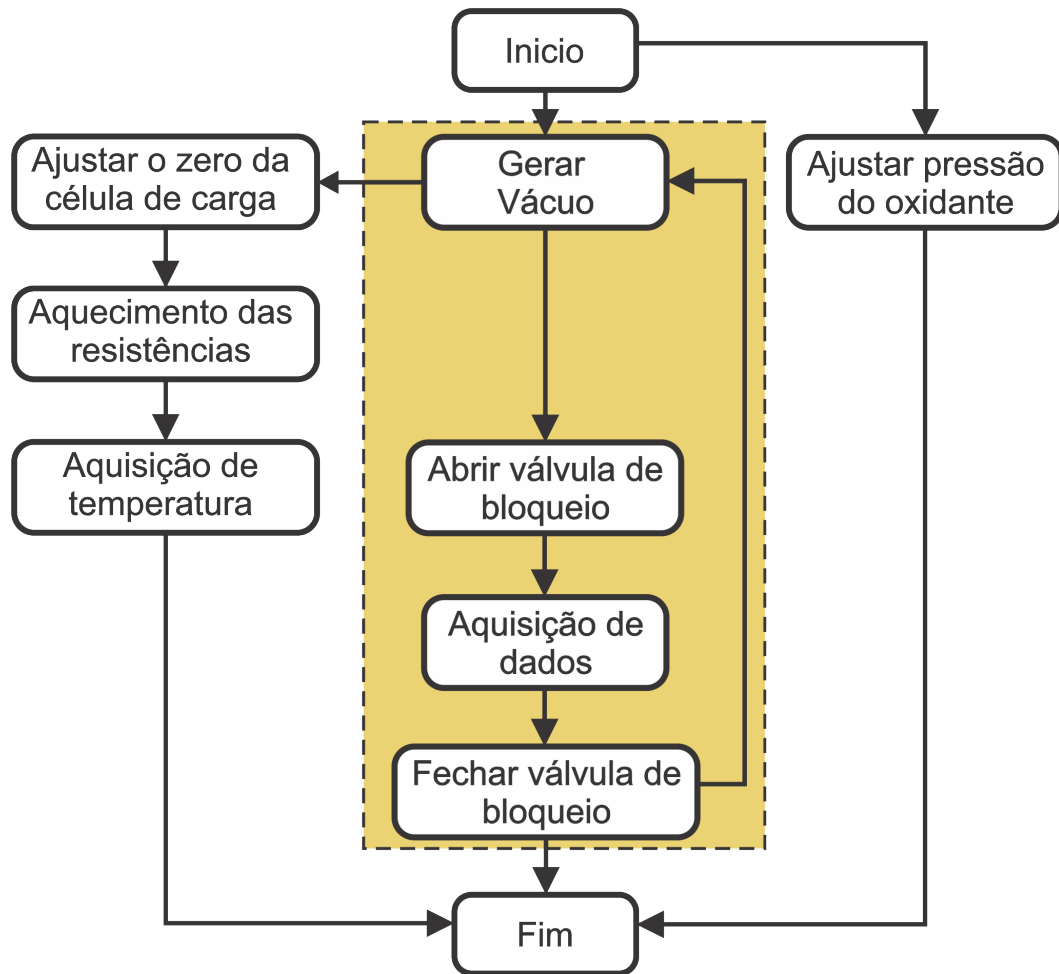
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 16 é uma representação em forma de fluxograma do procedimento experimental adotado para fazer análises de sensibilidade e dos parâmetros de desempenho aeroespaciais. Inicialmente foi realizado um ajuste na pressão do oxidante, na válvula reguladora de vazão, da Figura 15.

O próximo passo foi ligar a bomba de vácuo, item 8 da Figura 15, realizado o vácuo, em seguida é necessário ajustar o zero da célula de carga, subtraindo o peso do anteparo. Ao mesmo tempo foi programada e ligada as resistências elétricas, itens da tabela 3.

Por fim, foi realizado vácuo novamente, então é aberto a válvula de bloqueio, item 4 da Figura 15, fazendo o oxidante entrar no tubo de quartzo, com a vazão mássica controlada, sendo obtido aquisição de dados, utilizando os equipamentos 2-4 da Figura 15, em seguida é fechada a válvula de bloqueio. Essa etapa foi repetida até completar

Figura 16 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autor (2019).

a quantidade de pontos estabelecido, para determinada distância axial.

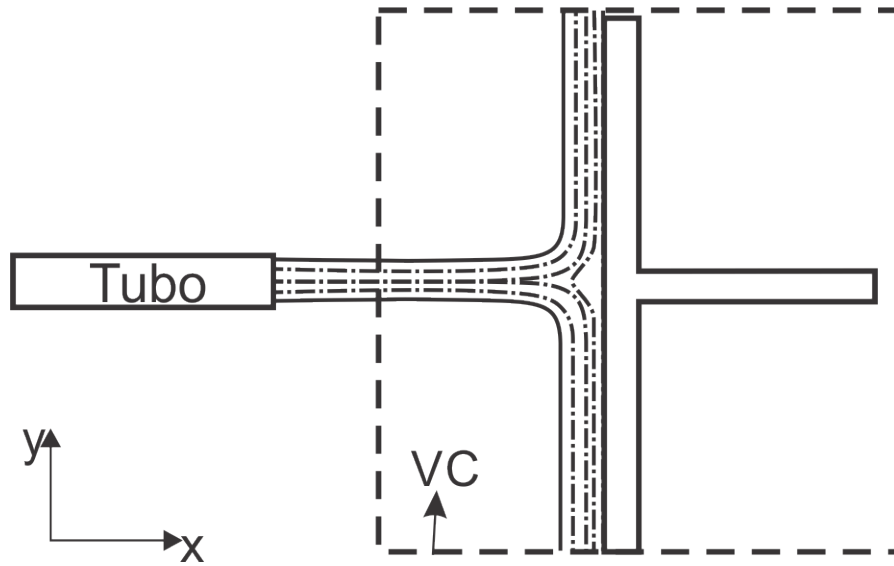
3.3 CÁLCULO TEÓRICO

Para os cálculos teóricos foi assumido um escoamento de ar, saindo de uma seção estacionária, de área (A_i) e velocidade (v), atingindo o anteparo, gerando uma força, sendo o escoamento normal e que escoar totalmente ao longo do anteparo, conforme a Figura 17, onde está definido o sistema de coordenada e volume de controle adequado. Considerando escoamento permanente, incompressível e uniforme, aplicando as Equações 1 e 4, em relação ao volume de controle selecionado, obtendo as seguintes equações:

$$\vec{F} = \sum_{sc} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot \vec{A} \quad (17)$$

$$\sum_{sc} \rho \vec{V} \cdot \vec{A} = 0 \quad (18)$$

Figura 17 – Representação da análise teórica



Fonte: Autor (2019).

Todas as aplicações realizadas foram no vácuo, a única força agindo é a do escoamento atingindo o anteparo, assim obtemos a seguinte equação resultante:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (19)$$

$$\begin{aligned} F &= v\rho VA \\ &= v\dot{m} \end{aligned} \quad (20)$$

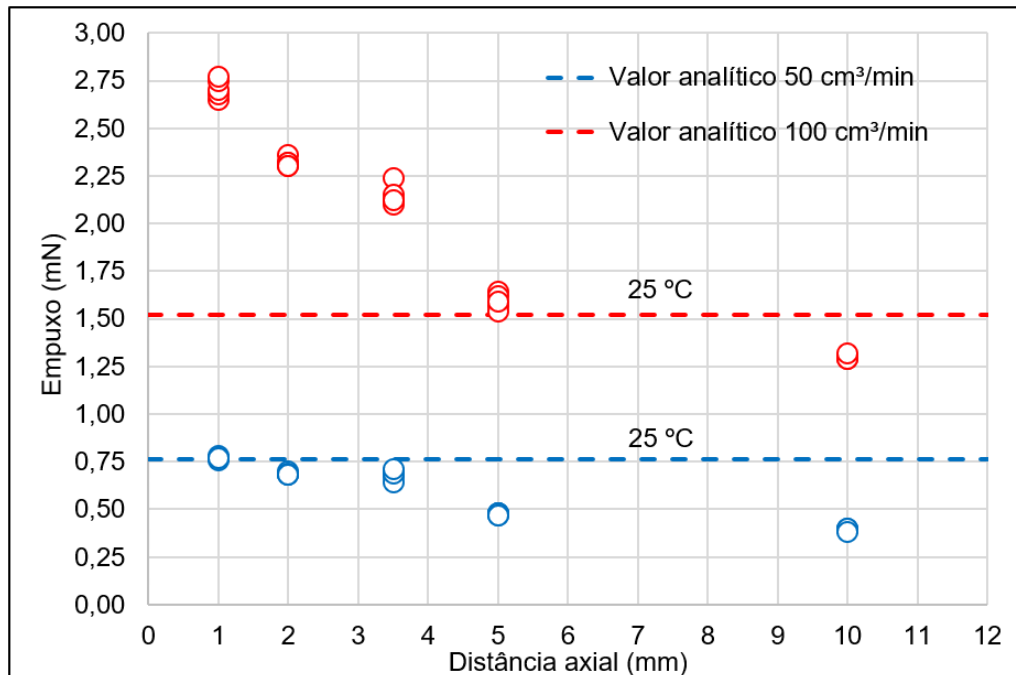
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

4.1.1 Análise da Distância Axial com bocal

A análise de sensibilidade foi necessária para descobrir o efeito que dois parâmetros importantes possuem no empuxo. O primeiro é a distância axial do bocal até o anteparo, o segundo foi a temperatura que se encontra o escoamento. As Equações 8 e 5 foram utilizadas para calcular o empuxo teórico e a velocidade de jato, a vazão mássica foi obtida da Equação 19, avaliada em duas ocasiões, descrita na tabela 6.

Figura 18 – Análise da distância axial para temperatura de 25 °C



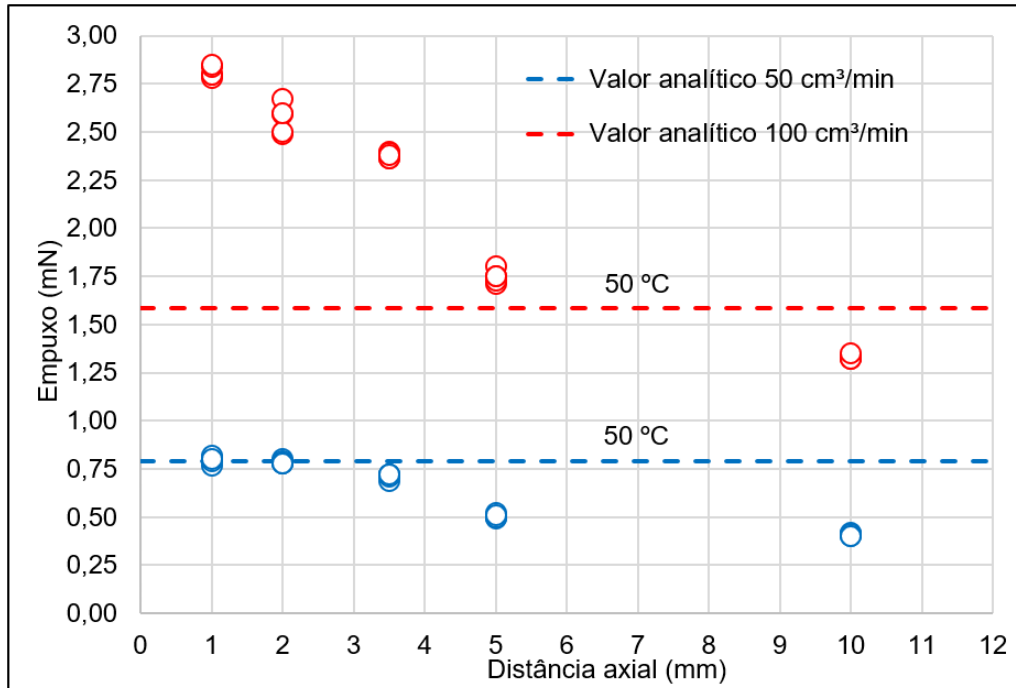
Fonte: Autor (2019).

Nos gráficos das Figuras 18 a 21 mostrou-se que para cada vazão volumétrica e temperatura, há uma determinada distância axial da saída do bocal até o anteparo, dentro da qual medida de força é constante e esse intervalo é diferente para diferentes vazões de gás e temperatura.

Observou-se que a distância do bocal em relação ao anteparo tem grande influência nos resultados obtidos de empuxo, quanto mais próximo, os valores de

empuxo experimentais extrapolaram os teóricos. O caso da Figura 21, para 1 milímetro de distância e vazão volumétrica de 100 cm³/min, chega a 60% de diferença. Na Figura 18, com 10 milímetros de distância axial para 50 cm³/min, o empuxo obtido foi abaixo do teórico, com erro de aproximadamente 50%.

Figura 19 – Análise da distância axial para temperatura de 50 °C

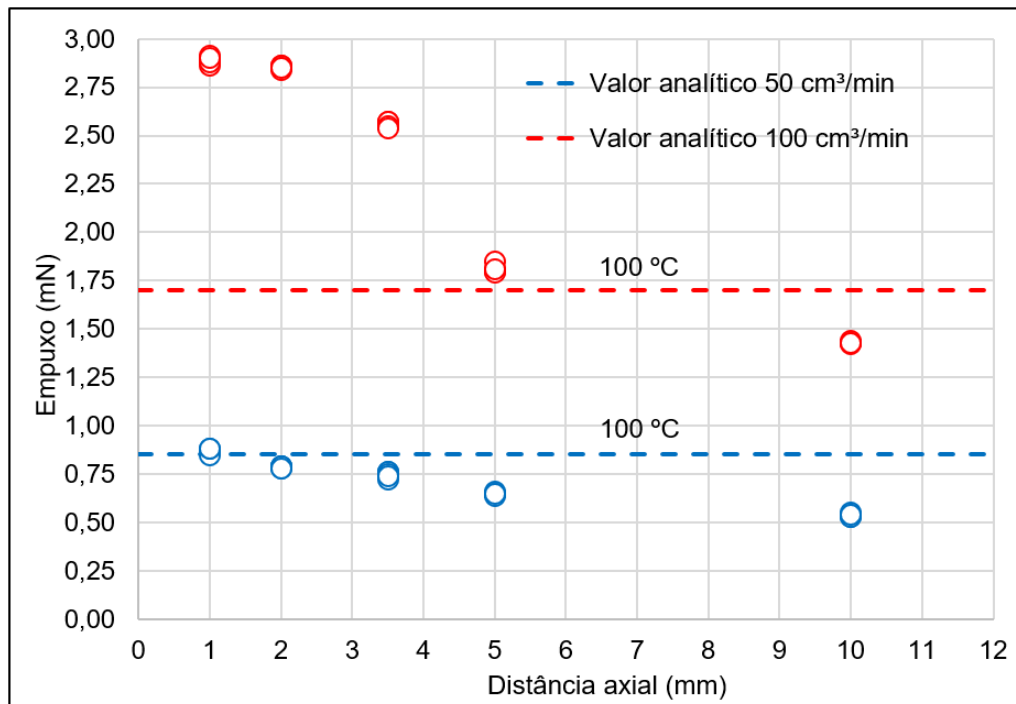


Fonte: Autor (2019).

Entre as Figuras 18 e 21, foi possível observar que para 10 e 5 milímetros, com vazões volumétricas de 100 e 50 cm³/min, foi obtido erro de aproximadamente 12%, sendo que o empuxo experimental ficou abaixo do teórico, valores que concordam mais com a realidade (WU et al., 2011). Para distâncias axiais e vazão volumétrica iguais, houve aumento no empuxo, esse efeito é causado devido a temperatura, sendo que o empuxo é diretamente proporcional à temperatura do escoamento (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

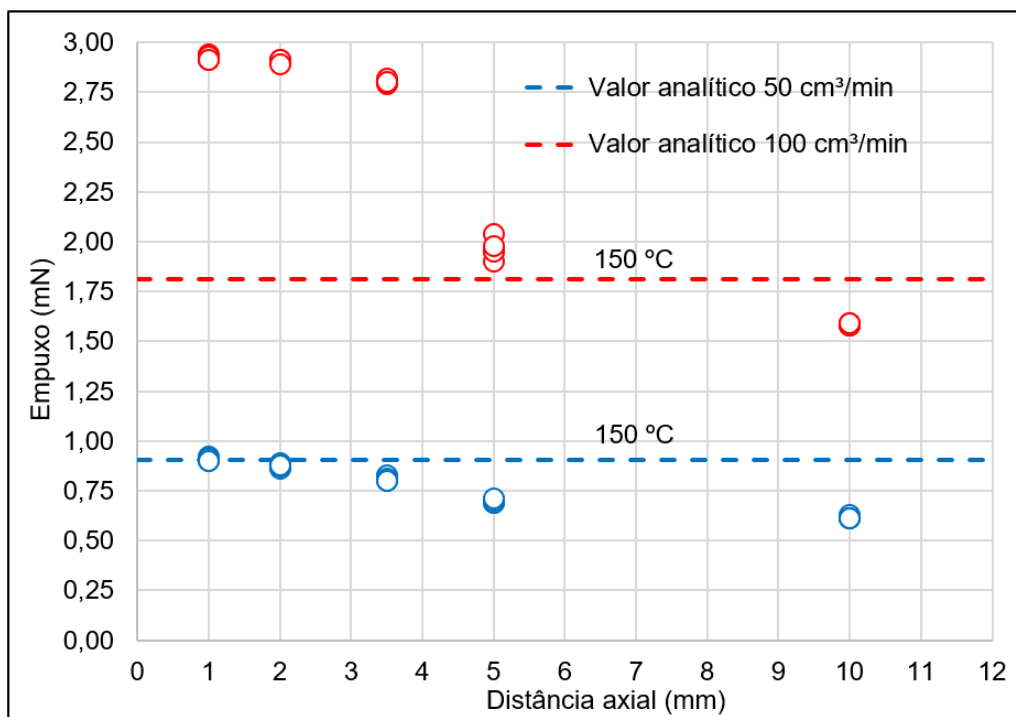
Para alta taxa de fluxo fornecida no experimento, a pressão na saída do bico é maior que a pressão ambiente e, portanto, o jato do bocal fica no estado subexpandido, ondas expansão e compressão aparecerão. Não é indicado o anteparo ficar próximo a saída do jato, pois o escoamento não está desenvolvido, ocasionando forças acima do previsto, lembrando que foi assumido expansão ótima nos cálculos teóricos (WU et al., 2011; FOX et al., 2000; SUTTON; BIBLARZ, 2016).

Figura 20 – Análise da distância axial para temperatura de 100 °C



Fonte: Autor (2019).

Figura 21 – Análise da distância axial para temperatura de 150 °C



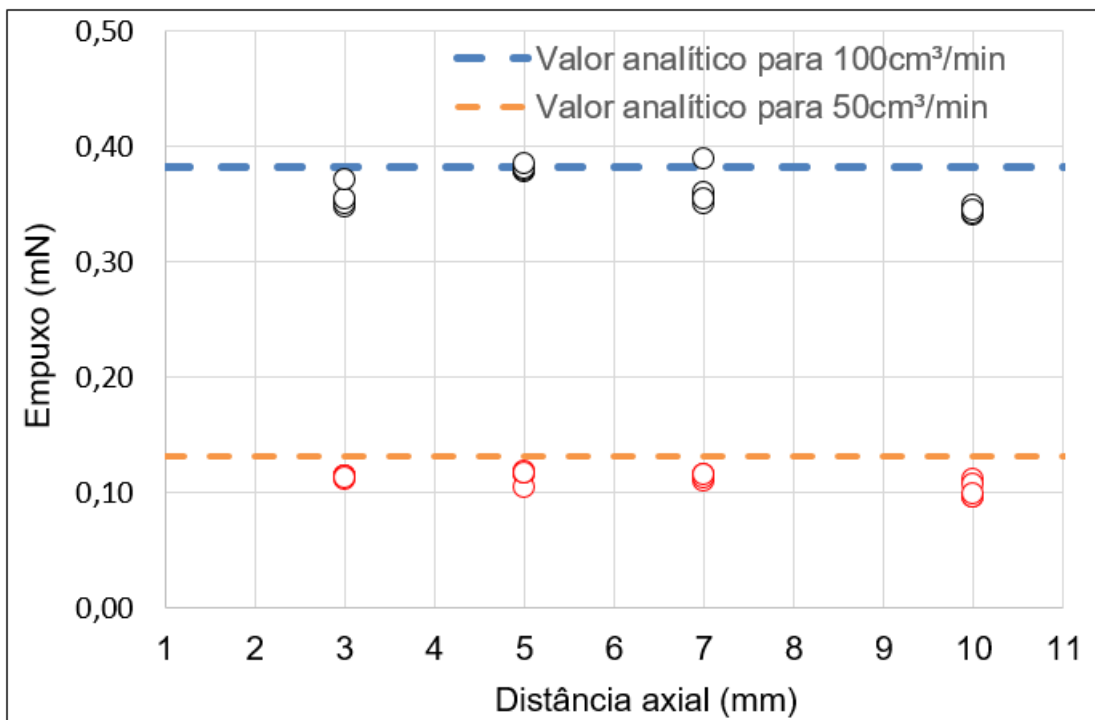
Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Análise da Distância Axial sem bocal

A Figura 22 apresenta o gráfico obtido a partir dos resultados experimentais para um tubo circular sem bocal. Foi utilizado duas vazões volumétricas de ar, 100 e 50 cm^3/min , e realizadas cinco coletas de dados para cada condição. A pressão inicial de 100 kPa, na temperatura de 25 °C. A tabela 6 apresenta as condições em que foram obtidos os resultados.

Os cálculos analíticos foram baseados nas equações de quantidade de movimento Equações 1 e 4, aplicando em um volume de controle inercial fixo em relação ao sistema de coordenadas cartesianas. Assumindo escoamento uniforme, permanente e incompressível (FOX et al., 2000).

Figura 22 – Análise da distância axial para temperatura de 25 °C sem bocal



Fonte: Autor (2019).

As medições experimentais apresentaram diferença de 20,00% e 10,00%, O desvio padrão médio calculado sobre os dados foram de 4,68 μN 2,12 μN , para as vazões de 100 e 50 cm^3/min respectivamente, em relação à predição teórica para escoamento em um tubo de seção constante. Observou-se que quando muito próximo do anteparo, a força começa a decair devido a zonas de recirculação ou ponto de estagnação. E quando muito longe o anteparo não detecta o escoamento, diminuindo a força (WU et al., 2011).

Tabela 6 – Propriedades utilizadas

Parâmetro	Valores
Pressão na câmara (Pa)	69
Área do tubo (m ²)	1,26e-5
Vazão mássica a 100 ccm (kg/s)	1,97e-6
Vazão mássica a 50 ccm (kg/s)	9,85e-7
Densidade do ar (kg/m ³)	1,181
Viscosidade do ar (Pa.s)	18,45e-6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

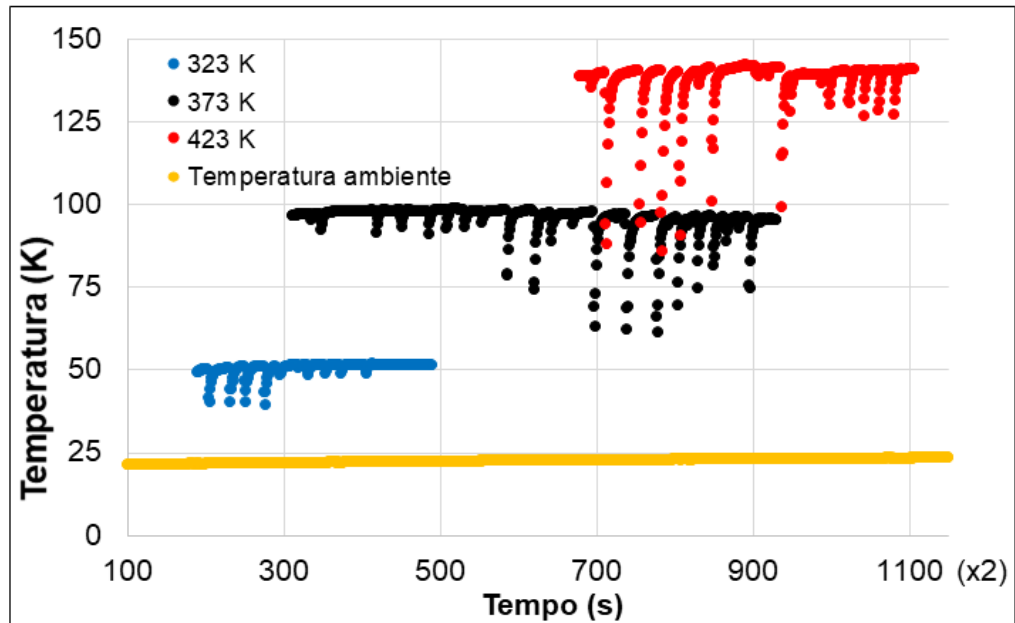
4.1.3 Análise da Temperatura

Foi necessário fazer aquisição da temperatura do escoamento dentro no tubo de quartzo, para descobrir o comportamento da temperatura quando programada na a resistência é obtida durante o processo. Foi registrado com um termopar dados de temperatura, nos gráfico das Figuras 23 e 24, observou-se uma queda da temperatura no tubo, quando o escoamento passa. Esse fenômeno ocorre devido o ar estar a temperatura ambiente.

Os pontos dos gráficos da Figura 23 e 24, sendo possível visualizar as regiões com menores e maiores quedas de temperatura, o que corresponde as vazões volumétricas utilizadas nos experimentos, 50 e 100 cm³/min respectivamente.

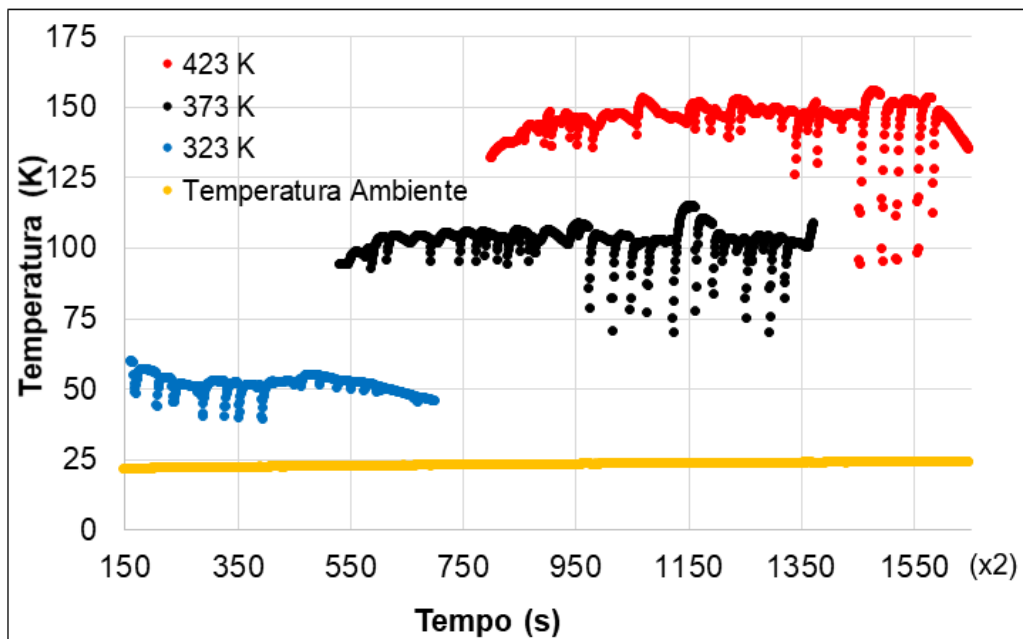
Outra questão observada, no caso da 24, para as temperaturas de 423 e 373 K, possui picos, ultrapassando a temperatura programada na resistência elétrica, ou seja, a queda na temperatura é abrupta, assim o controlador envia mais potência á resistência, que por sua vez tem uma demora no tempo de resposta, sendo ocasionado por inércia térmica (NOVUS, 2018).

Figura 23 – Dados de temperatura do escoamento



Fonte: Autor (2019).

Figura 24 – Dados de temperatura do escoamento



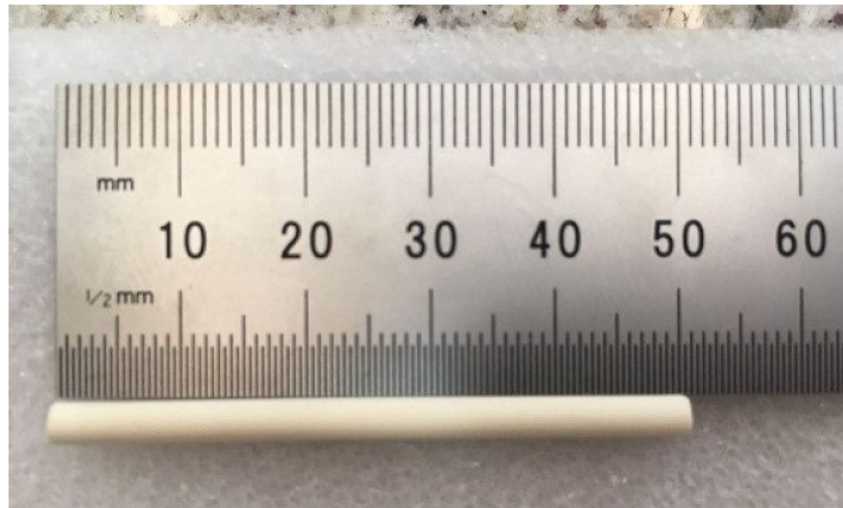
Fonte: Autor (2019).

4.2 FABRICAÇÃO DO BOCAL

A primeira questão levantada para dimensionar o bocal, foram as dimensões do reator catalítico e toda a síntese, assim como o tipo de catalisador utilizado, e os meios de impregnação, foram realizadas. O reator de alumina da Figura 25, foi utilizado no

projeto, possui diâmetro externo e interno de 3,6 mm e 1,8 mm, respectivamente, com comprimento de 50 mm, em média. A influência do uso de etanol como combustível, na concentração de 99,3% e ar como oxidante (21% Oxigênio e 79% Nitrogênio), foram investigado para diferentes razões de estequiometria, assim como o efeito do catalisador na reação de combustão (COELHO, 2018).

Figura 25 – Reator catalítico.



Fonte: (COELHO, 2018).

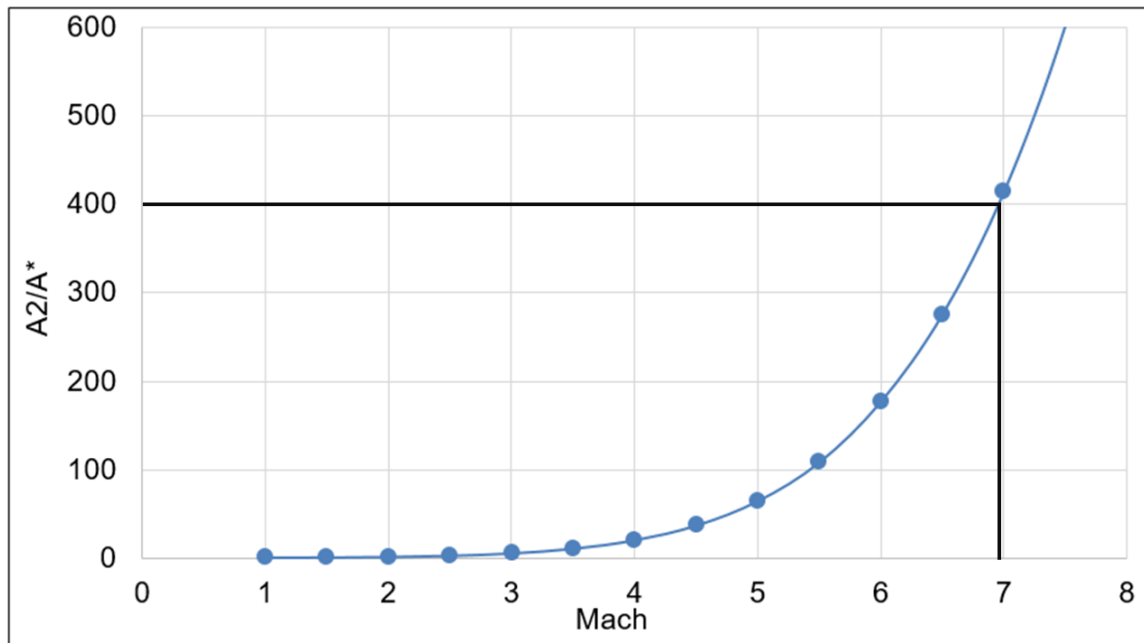
Com base nas dimensões do reator, foi estabelecido o diâmetro interno e externo da tubo de quartzo para o escoamento, da Figura 10. O tubo tem como objetivo suportar o reator, e nele será fabricado o bocal.

Os Gases de um bocal ideal, provenientes da reação de combustão que ocorre no reator catalítico, se expande de forma isentrópica, a 2,73 K e 0 atm, na saída do bocal, condição no espaço. Essa situação, onde exige aplicações no vácuo, é necessário estipular um valor para razão da área de saída com a garganta do bocal, para aplicações no vácuo é recomendado o valor de 400 (RAMAMURTHI, 2010).

Se a proporção for muito pequena, a velocidade supersônica não poderá ser alcançada. Valores acima de 100, garante expansão ótima, e também evitam efeitos viscosos, que faz o processo de expansão no bico seja incompleto (WU et al., 2015).

Na Figura 26, esboça graficamente a razão de área entre a saída do bocal e garganta, para diferentes valores de Mach na saída, foi utilizado a Equação 16, para $\gamma=1,3$, obtendo o valor aproximado de Mach igual a 7. Com base nas dimensões do tubo de quartzo, e na razão de áreas, foram estabelecidos as dimensões do bocal, que obtêm o maior desempenho, sendo possível de fabricar. Lembrando que foram assumidas várias hipóteses de idealidade, devido a dificuldade de se projetar um bocal.

A construção do bocal é outra questão muito importante, principalmente devido

Figura 26 – Gráfico da razão de A_2/A^* para diferentes Mach.

Fonte: Autor (2019).

a escolha do material. As temperaturas que podem atingir na combustão são elevadas, o uso de quartzo foi prevendo esse limitante, o material tem alto ponto de fusão, aproximadamente 1710 °C, e se obtêm ótimo acabamento superficial (LOBATO, 2009).

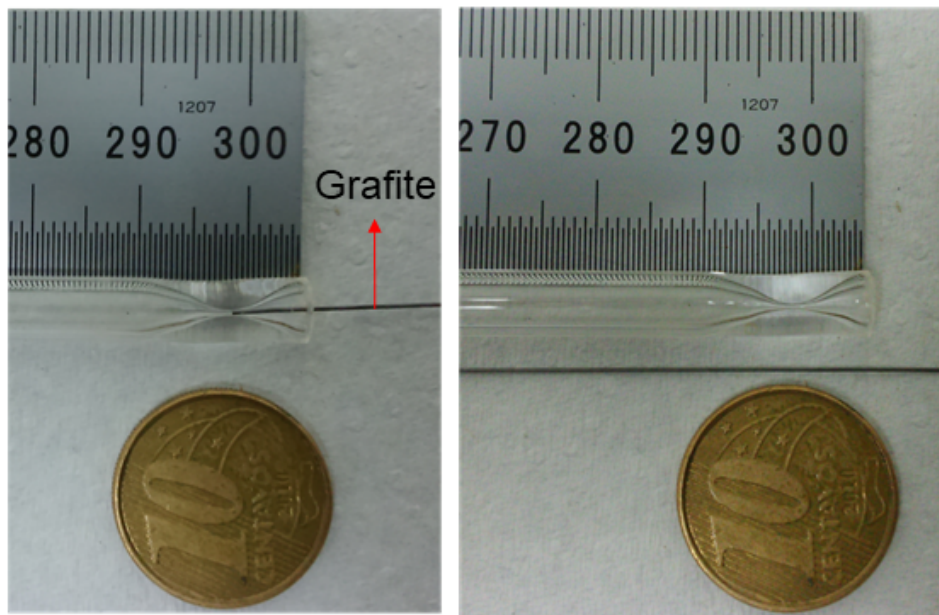
A Figura 27 apresenta o bocal fabricado em quartzo, o diâmetro na garganta e saída ficaram 0,2 e 4 milímetros, para efeitos de comparação, um grafite de 0,3 milímetros e uma moeda foram adicionados. O diâmetro na saída do bocal foi fixado, para facilitar a fabricação. É possível observar que a parte convergente do bocal na Figura 27, é curta, para bicos curtos, o fluxo atinge velocidades supersônicas na saída, evitando desaceleração dentro do bocal, causadas por ondas de choque, evitando perdas no impulso. A tabela 7 possui os valores utilizados para projetar o bocal.

Tabela 7 – Informações do bocal

Parâmetros	Valores
A_2/A_t	400
Diâmetro da garganta do bocal (mm)	0.2
Diâmetro da saída do bocal (mm)	4
Diâmetro do reator (mm)	1.8
Comprimento do reator (mm)	50

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 27 – Imagem do bocal fabricado.



Fonte: Autor (2019).

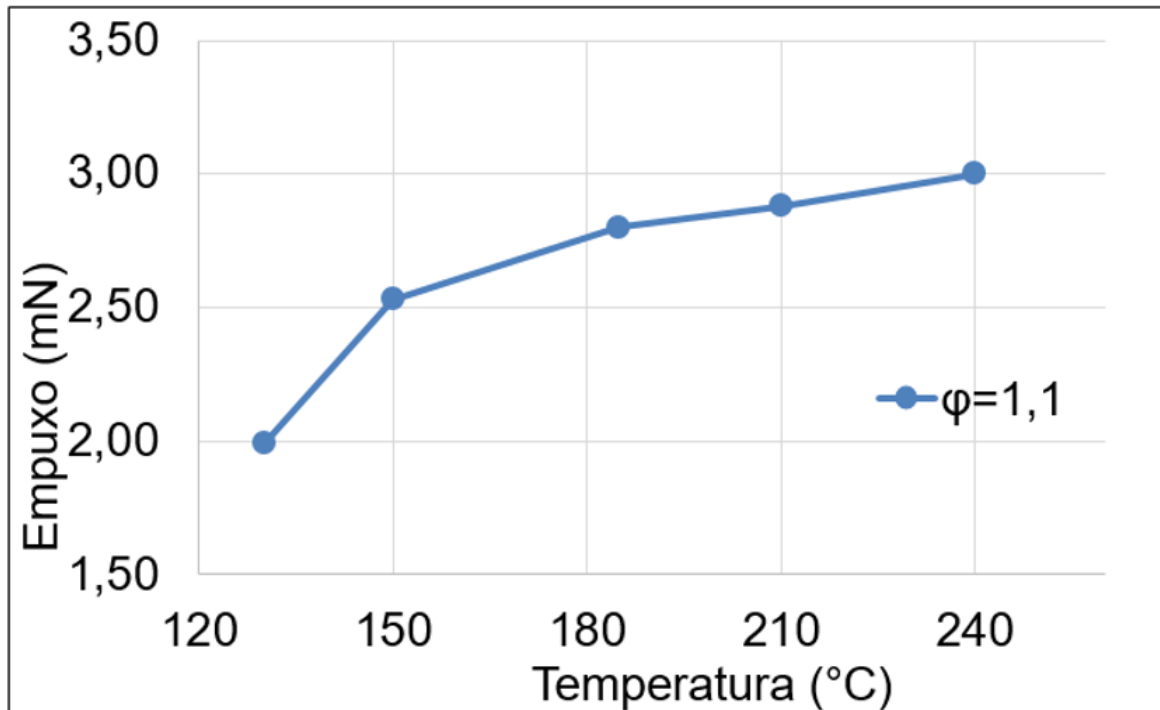
4.3 RESULTADOS COM ETANOL

Nessa etapa foi utilizado etanol como combustível e ar como oxidante, nas vazões mássicas de 14,43 e 118,2 mg/min respectivamente, o que representa razão de equivalência igual a 1,1. A mistura foi preaquecida, chegando na forma de vapor no reator da Figura 25, para garantir expansão ótima no bocal da Figura 27, e evitar perda de carga no reator (WU et al., 2015).

Com base na análise de sensibilidade foi determinado 10 milímetros a distância axial, foram realizados experimentos para diferentes temperaturas obtendo os gráficos das Figuras 28 e 29. Observou-se com aumento da temperatura, houve aumento nos valores de empuxo e impulso específico, sendo que o empuxo é diretamente proporcional à temperatura da câmara de combustão.

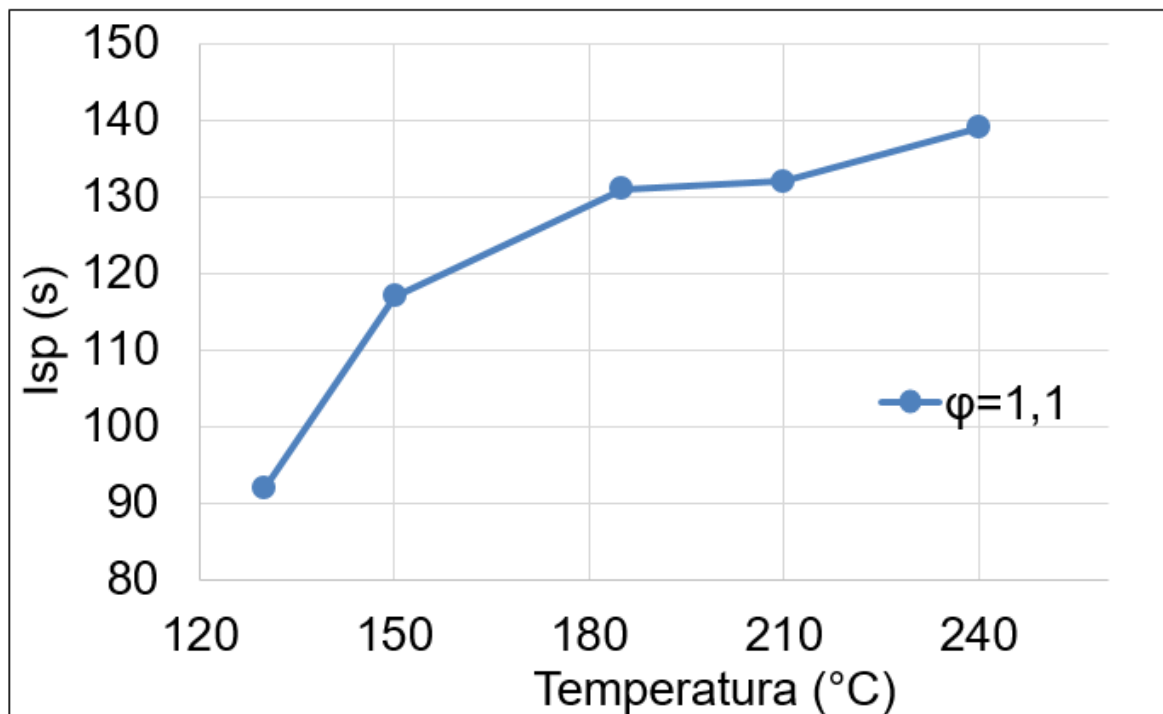
Os valores de impulso específico e empuxo, Figura 29 28, são próximos uns dos outros, devido à presença expressiva de N_2 na composição do oxidante. Quanto maior a soma da massa molar na mistura dos produtos, menor a velocidade de expansão no bocal, e também o N_2 acaba sendo inerte na reação, diminuindo a temperatura na câmara de combustão sendo que o empuxo é diretamente proporcional à temperatura da câmara de combustão (MATSUSHIMA et al., 2016).

Figura 28 – Resultados de empuxo experimental utilizando etanol.



Fonte: Autor (2019).

Figura 29 – Gráfico de impulso específico para etanol e ar.



Fonte: Autor (2019).

O impulso específico experimental encontrado foi de 92-139 s, para condição de razão de equivalência igual a 1,1. A Tabela 8 apresenta publicações de resultados experimentais no vácuo, para vazão mássica da mesma ordem do experimento, visto esses trabalhos, os resultados obtidos demonstra-se satisfatório.

Tabela 8 – Comparação entre trabalhos publicados

Publicações	Combustível	Isp (s)
(KUNDU et al., 2012)	Peróxido de hidrogênio	80-180
(MATSUSHIMA et al., 2016)	Etanol e Peróxido de hidrogênio	129-200
(HUH; KWON, 2014)	Etanol e Peróxido de hidrogênio	80-120
(SCHARLEMANN, 2007)	Peróxido de hidrogênio	153-230

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

5 CONCLUSÕES

Uma bancada experimental no vácuo foi projetada, construída e validada com seus devidos sistemas de controle de temperatura e reagentes para aquisição de baixa propulsão. Foram obtidos parâmetros aeroespaciais em um bocal convergente-divergente com razão de área de saída por garganta de 400 utilizando etanol como combustível e um microrreator catalítico de alumina com catalisador Pt/Al₂O₃.

- A bancada apresentou boa execução dos experimentos, o vácuo gerado na câmara foi de forma rápida, na faixa de 50-70 Pa, mantendo constante durante as análises, demonstrando satisfatório o projeto e sua construção.
- O empuxo foi maior com o aumento da temperatura nas análises de sensibilidade com bocal, o que era esperado, com o aumento da temperatura se obtêm maior velocidade de jato e assim o empuxo. O erro ficou aproximadamente 12%, quando comparado com predições teóricas, que pode estar relacionado às simplificações que foram adotadas nos cálculos teóricos.
- Para um tubo circular de seção constante o empuxo aumenta ou diminui em função da distância axial, mantendo constante as condições aplicadas, obtendo erro de 20% e 10% para vazões de 100 e 50 cm³/min. A principal fonte de erro foi aquisição da pressão na câmara, sendo adquirida de forma visual e anotada.
- Empuxo médio e impulso específico máximos encontrados foram de 3 mN e 139 s, respectivamente, considerados valores satisfatórios quando comparados à literatura.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar uma análise experimental e simulação dos efeitos do bocal, para diferentes razões de área da saída sobre a garganta e ângulos.
2. Testar outros propelentes, por exemplo peróxido de hidrogênio ou *blend* com etanol.
3. Investigar a possibilidade de projetar e construir um micropropulsor catalítico próximo a uma aplicação, acoplado com sistema de temperatura e alimentação de reagentes

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. **Modern compressible flow: with historical perspective**. New York, New York, EUA: McGraw-Hill New York, 1990. v. 12.
- CHAVERS, D. G. et al. Momentum and heat flux measurements using an impact target in flowing plasma. **Journal of propulsion and power**, v. 22, n. 3, p. 637–644, 2006.
- COELHO, G. E. **Desenvolvimento de microrreator catalítico para aplicação em propulsão operando com etanol**. Dissertação (Tese de mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, Brasil, Setembro 2018.
- DONCASTER, B.; WILLIAMS, C.; SHULMAN, B. **Nano/Microsatellite Market Forecast**. Atlanta, GA, 2017.
- EL-SAYED, A. F. **Fundamentals of aircraft and rocket propulsion**. Berlim, Alemanha: Springer, 2016.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. Hoboken, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2000.
- HITT, D. L.; ZAKRZWSKI, C. M.; THOMAS, M. A. Mems-based satellite micropropulsion via catalyzed hydrogen peroxide decomposition. **Smart Materials and Structures**, v. 10, n. 6, p. 1163, 2001.
- HUH, J.; KWON, S. Design, fabrication and thrust measurement of a micro liquid monopropellant thruster. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, IOP Publishing, v. 24, n. 10, p. 104001, 2014.
- KUNDU, A. K. **Aircraft design**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2010. v. 27.
- KUNDU, P. et al. Mno₂ nanowire embedded hydrogen peroxide monopropellant mems thruster. **Journal of Microelectromechanical Systems**, IEEE, v. 22, n. 2, p. 406–417, 2012.
- LEMMER, K. Propulsion for cubesats. **Acta Astronautica**, v. 134, p. 231–243, 2017.
- LOBATO, E. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral, **A mineração Brasileira**. 2009.
- MATSUSHIMA, J. et al. Development of propulsion system with bi-propellants based on green propellant for microsatellite. In: **52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 4906.
- NOVUS. **Introdução ao controle PID básico**. [S.l.], 2018.

- PATEL, K. D. et al. Electrokinetic pumping of liquid propellants for small satellite microthruster applications. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 132, n. 2, p. 461–470, 2008.
- RAMAMURTHI, K. **Rocket Propulsion**. Boca Raton, Flórida, EUA: Macmillan, 2010.
- SCHARLEMANN, C. Development of miniaturized green propellant based mono- and bipropellant thrusters. In: **43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 5580.
- SCOTT, H. F. **Elements of chemical reaction engineering**. [S.l.]: Prentice Hall, 2016.
- SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket propulsion elements**. Danvers, Massachusetts, EUA: John Wiley & Sons, 2016.
- TUMMALA, A.; DUTTA, A. An overview of cube-satellite propulsion technologies and trends. **Aerospace**, v. 4, n. 4, p. 58, 2017.
- TURNER, M. J. **Rocket and spacecraft propulsion: principles, practice and new developments**. Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media, 2008.
- URNS, S. R. **Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- VELHO, C. J. Relatório final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq – BIP/UFSC 2016/2017, **Desenvolvimento de micropropulsores catalíticos a etanol**. 2017.
- WARD, T. A. **Aerospace propulsion systems**. Hoboken, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2010.
- WU, C.-K. et al. Mechanisms for non-ideal flow in low-power arc-heated supersonic nozzles. **Acta Mechanica Sinica**, Springer, v. 31, n. 4, p. 500–511, 2015.
- WU, C.-K. et al. Aerodynamics of indirect thrust measurement by the impulse method. **Acta Mechanica Sinica**, v. 27, n. 2, p. 152–163, 2011.
- YAO, X. et al. Review of the applications of microreactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 519–539, 2015.

ANEXO A

Charge Meter

Type 5015A...

Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology

This instrument can be used wherever mechanical quantities are measured with piezoelectric sensors. Piezoelectric sensors produce an electric charge which varies in direct proportion to the load acting on the sensor.

- Single-channel charge amplifier
- Piezotron input (option)
- Measure-jump compensated
- Liquid crystal display (128x128 pixels)
- Menu-driven operation
- Direct signal evaluation
- Flexible adjustment of high-pass and low-pass filters
- Compatible with Charge Amplifier Type 5011B...
- PC-Software and Virtual Instrument Driver for LabVIEW



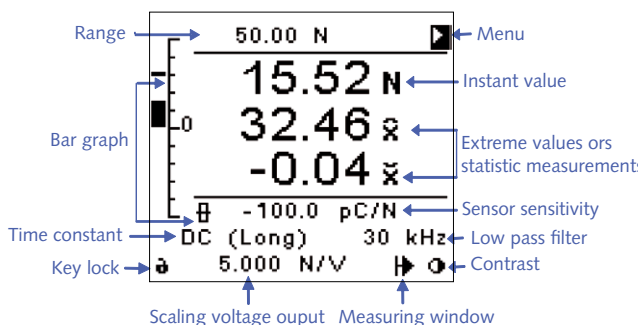
Description

The Type 5015A... is not only a charge amplifier but an universal Charge Meter with a graphical liquid crystal display. However, the 19"-rack module is also suitable for measurements in an industrial environment. It can display instantaneous, peak and average values as well as reference deviations. State-of-the-art technology allows the naturally occurring interference to be almost entirely eliminated. The instrument is distinguished first by its excellent technical data and secondly by its extremely simple operation.

Application

The instrument has been designed for use in research, development and the laboratory.

Operation



5015A_000-297e-10.18

Technical Data

Charge Input

Connector Type		BNC neg.
Measuring range FS	pC	±2 ... 2 200 000
Measurement uncertainty		
Range FS <10 pC	%	<±3
Range FS <100 pC	%	<±1
Range FS ≥100 pC	%	<±0,5
Drift, measuring mode DC (Long)		
at 25 °C, max. relative humidity RH of 60 % (non-condensing)	pC/s	<±0,03
at 25 °C, max. relative humidity RH of 70 % (non-condensing)	pC/s	typ. <±0,05
at 50 °C, max. relative humidity RH of 50 % (non-condensing)	pC/s	<±0,3
Max. common mode voltage between input and output ground	V	<±30
Overload	%FS	≈±105

Voltage Input (Piezotron)

Connector Type		BNC neg.
Measuring range FS	mV	±2 ... 20 000
Measurement uncertainty		
Range FS <10 mV	%	<±3
Range FS <100 mV	%	<±1
Range FS 100 mV	%	±0,5

Drift, meas. mode voltage DC (long) (@ Range 10 V FS; Gain = 1) at 25 °C, max. relative humidity RH of 60 % (non-condensing)	mV/s	<±0,03
at 50 °C, max. relative humidity RH of 50 % (non-condensing)	mV/s	<±0,3
Max. common mode voltage between input and output ground	V	<±30
Overload	%FS	≈±105
Piezotron mode		
Supply current	mA	4 ±10 %
Input voltage swing	V	0 ... 20

Voltage Output

Connector Type		BNC neg.
Output range FS	V	±10/±5/±2,5/±2
Output current	mA	<±2
Output impedance	Ω	≈10
Measure-jump		Compensated
Measure-jump (Long)	mV	<±3
Correction time, inclusive reed-relay delay time	ms	<15 ¹⁾
Zero errors	mV	<±2

Output interference (0,1 Hz ... 1 MHz), Type 5015Axxx0

Range FS, LP filter off		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<140 ... <40
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<30 ... <10 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
0,220 ... 2,200 μC	mVpp	<15 ... <7 ¹⁾
Range FS, LP filter 30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<60 ... <20
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
0,220 ... 2,200 μC	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾

Output interference (0,1 Hz ... 1 MHz), Type 5015Axxx1

Range FS, LP filter off		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<220 ... <50
10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<50 ... <12 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
...	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
0,220 ... 2,200 μC	mVpp	<20 ... <7 ¹⁾
Range FS, LP filter 30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<180 ... <50 ¹⁾
10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<30 ... <10 ¹⁾
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
...	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾
0,220 ... 2,200 μC	mVpp	<10 ... <5 ¹⁾

¹⁾ Values valid from MCC version V2.xx

Frequency Response

DC (Long), LP-filter off		
Bandwidth (-3 dB)	kHz	≈0 ... 200
Group delay	μs	≈10

High-pass Filter (1st order)

Analog high-pass filter		
DC (Long)		
Range FS Charge, (Voltage)		
2 pC, (mV)	s	10 000
1 000 pC, (mV)	s	100 000
Time constants		
Medium	s	10/100/1 000/22 000
Short	s	0,1/1/10/220
Tolerance	%	<±20

Digital high-pass filter computed by DSP

Time constants		
Range FS Charge, (Voltage)		
2 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1
100 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10
≥1 000 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10/100
Tolerance	%	<±20
Cutoff frequencies		
-3 dB	Hz	16/1,6/0,16/0,016/ 0,0016
-10 %	Hz	30/3/0,3/0,03/0,003
-5 %	Hz	50/5/0,5/0,05/0,005
-1 %	Hz	100/10/1/0,1/0,01

Low-pass Filter

Digital low-pass filter computed by DSP		
Filter Type		IIR, linear phase
Order		2. or 5.
Cutoff frequency (-3 dB)	Hz	5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 500
	kHz	1, 2, 3, 5, 10, 20, 22, 30, (LP off)
Tolerance	%	<±10

5015A_000-297e-10.18

Signal Evaluation

Sample rates		
LP-filter on	ksps	400
LP-filter off	ksps	1 000
Minimum pulse width for peak-peak value detection		
LP-filter 5 Hz ... 30 Hz	µs	>2 500
LP-filter 50 Hz ... 300 Hz	µs	>250
LP-filter 500 Hz ... 3 kHz	µs	>25
LP-filter 5 kHz ... 30 kHz	µs	>2,5
LP-filter off	µs	>1
Max. integration time for mean value		
	min	<75
Integration time for the updating rate of the liquid crystal display		
Instant value	ms	300
Characteristic values	ms	300
Bar graph	ms	17,5

Remote Control

Connector Type		MiniDin round socked
Pin allocation		
Inputs with internal pull-up resistor		
Pin 4 (input)		Window (remote)
Pin 5 (input)		Measure (remote)
Pin 6		DGND
Input voltage		
logic inactive or input open	V	3,5 ... 30
logic active	V(mA)	0 ... 1 (0 ... 4)
Delay time		
Window (remote)	ms	<0,5
Measure (remote)	ms	<15

Digital Measuring Data Transfer

The instrument provides a continuous measuring data transfer via the serial interface to a PC. For this the PC software (Windows) of the VI driver (LabVIEW) is required. This feature is not available on the IEEE-488 interface.

Sampling rates	ksps	0,1/0,25/0,5
----------------	------	--------------

RS-232C Interface (Electrically Separated)

EIA-standard		RS-232C
Connector Type		DB-9S (D-Sub)
Pin allocation		
Pin 2		RxD
Pin 3		TxD
Pin 5		SG
Max. cable length at		
9 600 bps	m	<15
19 200 bps	m	<15
38 400 bps	m	<12
57 600 bps	m	<10
115 200 bps	m	<5
Max. input voltage, continues	V	<±20
Max. voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<20
Baud rates	bps	1 200/9 600/ 19 200/38 400/ 57 600/115 200
Data-bit		8
Stop-bit		1
Parity		none
SW handshake		none

IEEE-488 Interface (Option)

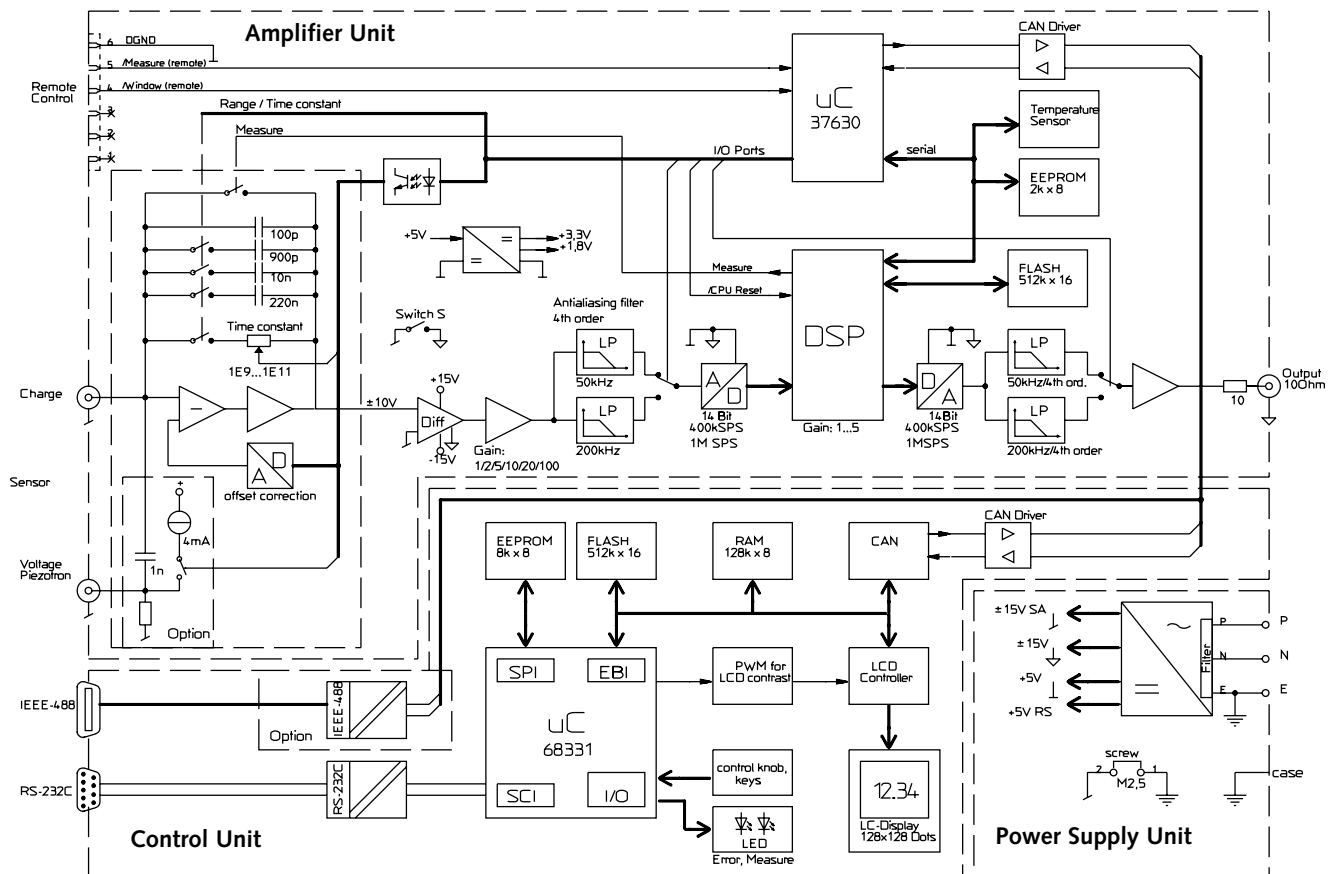
Standard		IEEE-488.1-1987
Connector Type		Microribbon series 57 (24-pole)
Max. distance between devices	m	2
Max. bus length	m	20
Max. number of devices		15
Adress range		0 ... 30
Functions		Listener and Talker
Interface functions		SH1, AH1, L4, LE0, T6, TE0, SR1, RL2, PP0,DC1, DT1, C0, E1
Multiline commands		DCL, SDC, GET, UNL, UNT, SPE, SPD
Uniline commands		IFC, REN, EOI, SRQ, ATN

Power Supply Connection

Power plug (2P+E, protect. class I)		IEC 320C14
Supply voltage setable	V~	115/230
Supply voltage tolerance	%	-22, +15
Supply frequency	Hz	48 ... 62
Consumption	VA	≈20
Voltage between Signal ground and protective ground	V _{RMS}	<50
Fuses		
F1 (slow)	mA	100
F2 (slow)	mA	100

Remaining Data

IP-Degree of protection		IP40, IEC 60529
Operating temperature	°C	0 ... 50
Storage temperature	°C	-10 ... 70
Rel. humidity, not condensing	%	10 ... 80
Vibration steadiness (20 Hz ... 2 kHz, duration 16 min, cycle 2 min.)	g	<10
Shock steadiness (1 ms)	g	<200
Housing dimensions		
with frame (wxhxd)	mm	105,3x142x253,15
without frame (wxhxd)	mm	71,12x128,7x230
Front panel (according DIN 41494, part 5/IEC 60297)	HE/TE	3/14
Weight	kg	≈2,3



5015A_000-297e-10.18

Fig. 1: Block Diagram of charge meter Type 5015A...

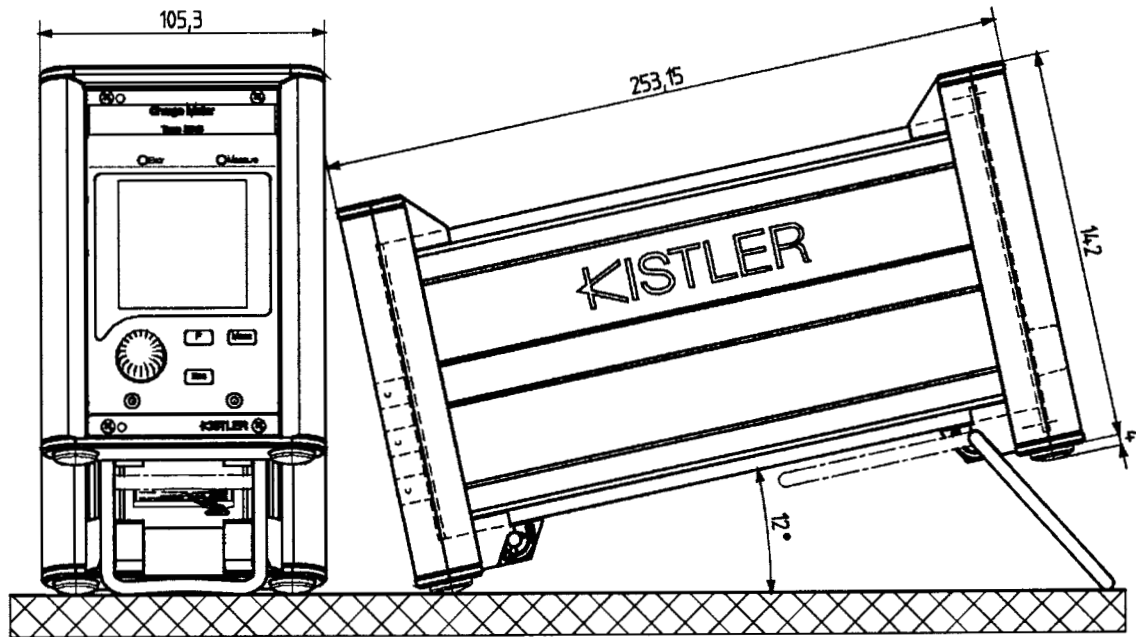


Fig. 2: Desktop Type 5015A1... (stackable)

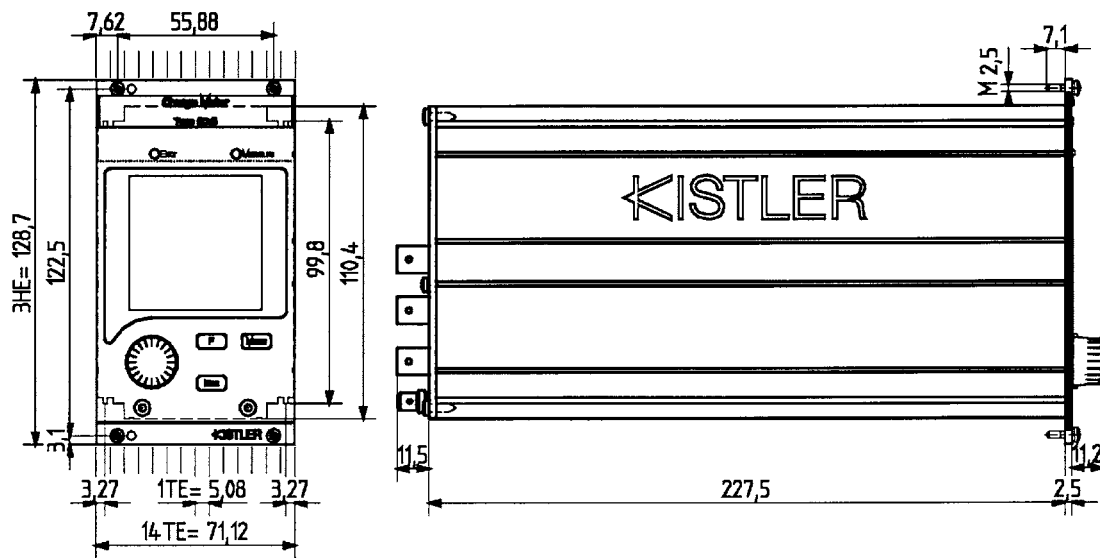


Fig. 3: 19"-Rack plug-in Type 5015A0...

5015A_000-297e-10.18

Included Accessories

Charge Meter Type 5015A... with

- Country-specific power cord
- Plug for 'Remote Control'
- Self-adhesive label with supply voltage details
- Flash-Loader with current firmware
- Demo-Program for visualization of the display on a PC
- PC-Software and VI-Driver for LabVIEW for the equipment configuration and measured data acquisition
- Instruction manual
- Calibration sheet

Optional Accessories

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • RS-232C cable, l = 5 m, null-modem, DB-9P/DB-9S • or PC-link cable RS-232C, l = 3 m, DB-25P/DB-9S • with suitable D-Sub adapter, DB-9P/DB-25S | <p>Type/Art. No.</p> <p>1200A27</p> <p>1465A3</p> <p>1479</p> |
|---|--|

Instrument Configurations

The complete type designation of the Charge Meter is made up of the basic type designation Type 5015A... and four additional digits.

The basic type contains a single-channel Charge Meter (with charge input for piezoelectric sensors) with display unit and RS-232C interface in the following versions:

Ordering Key

		Type 5015A	□ □ □ □
Size/Measuring Range			↑ ↑ ↑ ↑
19" rack module version according to DIN 41494; width 14 TE and height 3 HE	0		
Desktop version with support bracket	1		
<hr/>			
Without interface option	0		
With IEEE-488 interface (option)	1		
<hr/>			
Adjusted in the factory to 230 V~; switching to 115 V~ supply by the user possible at any time	0		
Adjusted in the factory to 115 V~; switching to 230 V~ supply by the user possible at any time	1		
<hr/>			
Without voltage input	0		
With voltage input for sensors with integrated Piezotron circuitry (option)	1		

5015A_000-297e-10.18

Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation.

LabVIEW is a registered trademark of National Instruments Corporation.

ANEXO B

Sensors for Small Forces

–0,5 ... 0,5 N to –500 ... 500 N

Type 9203, 9205, 9207,
9215A, 9217A

These slim sensors are designed for dynamic and quasistatic tensile and compression forces. Depending on the design of the sensor, it is possible to measure small forces in measuring ranges between –0,5 ... 0,5 N to –500 ... 500 N. As a result of the high sensitivity of the integrated measuring element and special constructive measures during force application, the sensors' threshold is less than one millinewton. The sensors have a sealed housing and are designed for use in industry and the laboratory. Installation of the sensors directly into the structure is made possible by the thread on the shaft. Force is applied to the front side.

- 3 calibrated measuring ranges
- Highly sensitive, for forces from 1 mN
- For tensile and compression forces
- Slim design for small sensor distances

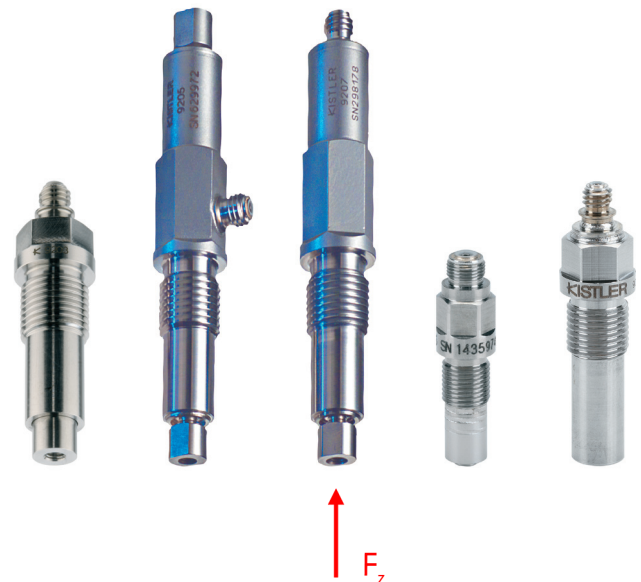
Description

The sensors are based on the piezoelectric measurement principle. The force acting on the highly sensitive transversal measuring element generates a proportional charge at the signal output. The measuring amplifier to be placed downstream (e.g., ICAM Type 5073A...) or process monitoring system (e.g., maXYmos Type 5867B... /5877A...) converts this into a process signal or curve that can be evaluated (e.g., 0 ... 10 V). The slim, pen-like structural shape of the sensor bodies and the force application on the axial tapped hole are important features of these sensors.

Application

Due to their slim geometry, the sensors are especially suitable for confined spaces, e.g., to simultaneously measure objects that are placed close together.

Due to the special property of the piezoelectric measuring element – almost constant measurement accuracy over a wide force range – the same sensor can be used across a large force spectrum. This advantage is further supported by the possibility of switching between measuring ranges by using appropriate amplifiers (ICAM Type 5073A...). This makes it possible to measure highly diverse parts at the same measuring station. The 'wide range measuring chain' also offers decisive advantages for use in a laboratory, where frequent sensor changes are part of everyday work. In addition, the extremely high overload protection when using the lower measuring ranges means there is no need for costly protective measures.



Type 9203 Type 9205 Type 9207 Type 9215A Type 9217A

Application Examples

- Contact measurement on keys, switches, relays, etc.
- Measuring spring characteristics
- Measuring pull-out forces on plug contacts
- Construction of highly sensitive miniature measuring platforms
- Force measurement on installation machines, robots, micro-manipulators, etc.

Caution

These force sensors are very sensitive measuring instruments. The highest amount of vigilance is required when working with these sensors, as they are not equipped with a mechanical fuse against overload.

Technical Data

Please note that all technical data and further information in this data sheet is subject to change at any time without prior notice.

	Type	9203	9205	9207	9215A	9217A
Measuring range F_z	N	-500 ... 500	-50 ... 50	-50 ... 50	-20 ... 200	-500 ... 500
Overload F_z	N	-600 / 600	-75 / 150	-75 / 150	-30 / 300	-600 / 600
Calibrated measuring ranges, F_z						
100 %	N	0 ... 500	-50 ... 50	-50 ... 50	0 ... 200	0 ... 500 0 ... -500
10 %	N	0 ... 50 0 ... -50	-5 ... 5	-5 ... 5	0 ... 20	0 ... 50 0 ... -50
1 %	N	0 ... 5	-0.5 ... 0.5	-0.5 ... 0.5	0 ... 2	0 ... 5
Threshold, F_z	N	<0,001	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,001
Sensitivity, F_z	pC / N	≈-40	≈-115	≈-115	≈-95	≈-105
Linearity, all measuring ranges	%FSO			≤±1		
Hysteresis, all measuring ranges	%FSO	≤±1	≤±0,5	≤±0,5	≤±1	≤±1
Side load ¹⁾ , max., F_{xy}	N	25	10	10	90	50
Side load sensitivity						
$F_{x,y}$ F_z	N / N	≤±0,25	≤±0,05	≤±0,05	≤±0,05	≤±0,02
Bending moment, max., $M_{x,y}$	N·m	0,59	0,25	0,25	0,5	1,78
Sensitivity to bending moment						
$M_{x,y}$ F_z	N / N·m	≤±12	≤±3	≤±3	≤±20	≤±4
Torque, max., M_z	N·m	0,67	0,15	0,15	1,0	1,35
Rigidity, c_z (F_z)	N / μm	≈40	≈4	≈4	≈100	≈15
Natural frequency, f_n (F_z)	kHz	>27	>10	>10	>50	>20
Acceleration sensitivity						
axial	N / g	<0,02	<0,03	<0,03	<2 · 10 ⁻³	<0,035
radial	N / g	<0,002	<0,003	<0,003	<4 · 10 ⁻⁴	<0,0022
Operating temperature range	°C	-150 ... 240	-50 ... 150	-50 ... 150	-50 ... 180	-50 ... 150
Temperature coefficient of sensitivity, F_z	% / °C	≈-0,01	≈-0,02	≈-0,02	≈< 0,04	≈< 0,04
Insulation resistance at 20 °C	Ω			>10 ¹³		
Capacity C	pF	≈22	≈26	≈26	≈15	≈45
Connection		KIAG 10-32 neg.	KIAG 10-32 neg.	KIAG 10-32 neg.	M4x0.35 neg.	KIAG 10-32 neg.
Protection class (with connected cable)	EN 60529			IP65		
Case material	DIN			1,4542		
Weight	g	13	19	19	2.5	16
Tightening torque, max., M_A						
M2	N·m				0.2	
M3	N·m	0.5	0.2	0.2		0.5
M5x0.5	N·m				2	
M10x1	N·m	10	10	10		10

¹⁾ Application of force on the flange level

Dimensions

Dimensions of Type 9203

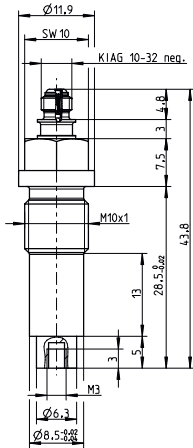


Fig. 1: Dimensions of sensor for small forces Type 9203

Dimensions of Type 9205

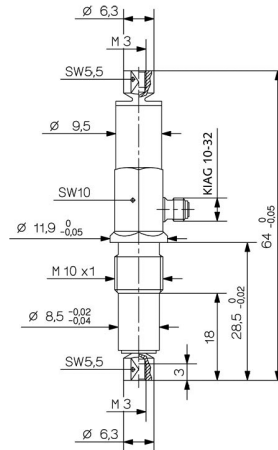


Fig. 2: Dimensions of sensor for small forces Type 9205

Dimensions of Type 9207

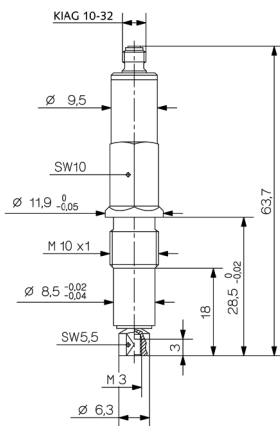


Fig. 3: Dimensions of sensor for small forces Type 9207

Dimensions of Type 9215A

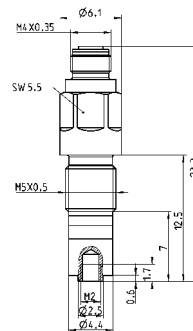


Fig. 4: Dimensions of sensor for small forces Type 9215A

Dimensions of Type 9217A

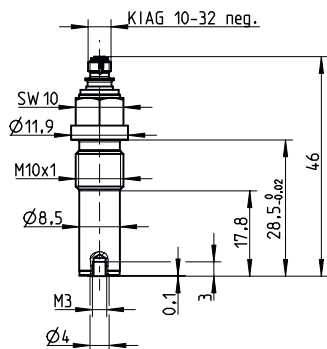


Fig. 5: Dimensions of sensor for small forces Type 9217A

9203_003-239e-11.18

Mounting Examples

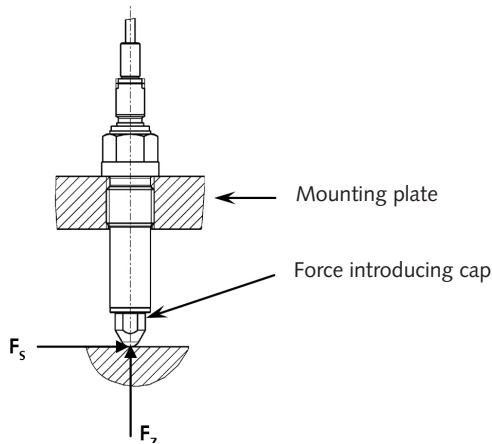


Fig. 6: Force application on force introducing cap

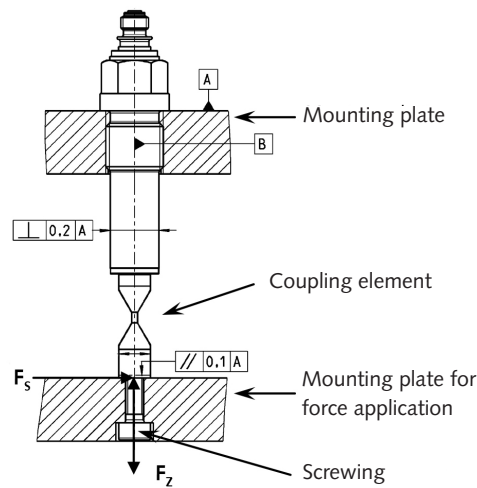


Fig. 7: Mounting with coupling element

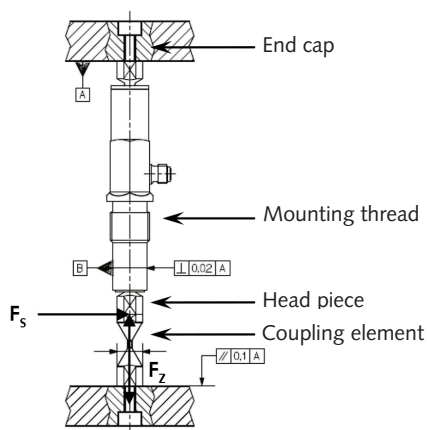


Fig. 8: Mounting of Type 9205 between two plates with coupling element

Accessories

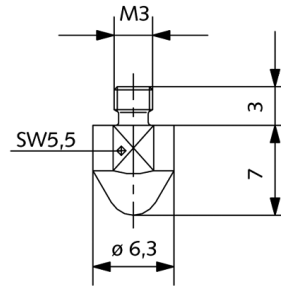


Fig. 9: Force introducing cap Art. No. 3.220.139 for Type 9203, 9205, 9207, and 9217A

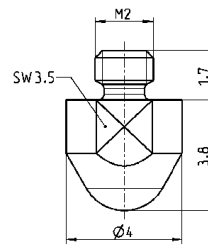


Fig. 10: Force introducing cap Art. No. 3.220.217 for Type 9215A

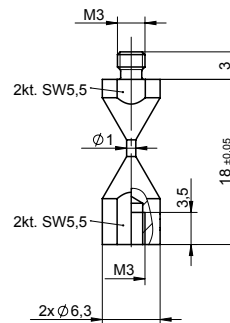


Fig. 11: Coupling element Type 9405 for Type 9203, 9205, 9207, and 9217A

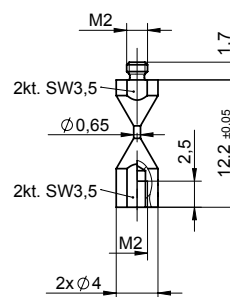


Fig. 12: Coupling element Type 9405A1 for Typ 9215A

9203_003-239e-11.18

Optional Accessories

	Type
• Force introducing cap	3.220.139
• Coupling element for Type 9203, 9205, 9207, and 9217A	9405
• Coupling element for Type 9215A	9405A1
• Connecting cable KIAG 10-32 pos. – BNC pos. Length 1 m	1631C1
Length 2 m	1631C2
Length 5 m	1631C5
Length 10 m	1631C10
• Fluoropolymer connecting cable, oil-proof for Type 9203, 9205, 9207, 9217A KIAG 10-32 pos. int. – BNC pos. Length 2 m	1983AD2
Length 5 m	1983AD5
• Connecting cable M4x0.35 pos. – BNC pos. for Type 9215A Length 1 m	1651C1
Length 2 m	1651C2
Length 5 m	1651C5
Length 10 m	1651C10
• Fluoropolymer connecting cable, oil-proof for Type 9215A M4x0.35 pos. int. – KIAG 10-32 pos. int. Length 1 m	1983AB1
Length 2 m	1983AB2
Length 3 m	1983AB3
Length 5 m	1983AB5
• Coupling for Type 9203, 9205, 9207, 9217A KIAG 10-32 neg. – KIAG 10-32 neg.	1729A
• Angle coupling for Type 9203, 9205, 9207, 9217A KIAG 10-32 pos. int. – KIAG 10-32 neg.	1700A29
• Cleaning and insulation spray 250 ml	1003
• Insulation testing device	5493

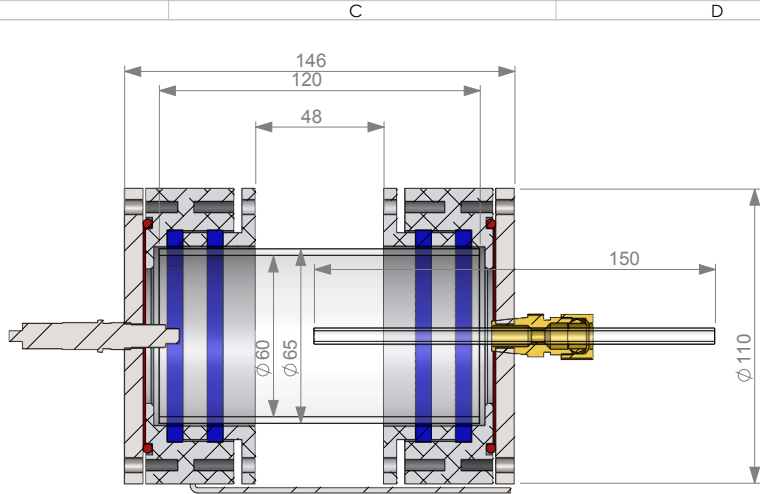
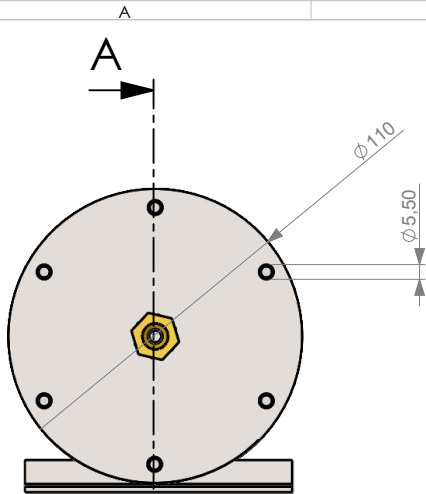
For connection, extension, and connecting cables, see data sheet for Cables for Force, Torque, and Strain Sensors (1631C_000-346).

For cable connectors, couplings, and accessories, see data sheet for Coaxial Cable Connectors (1700_000-347).

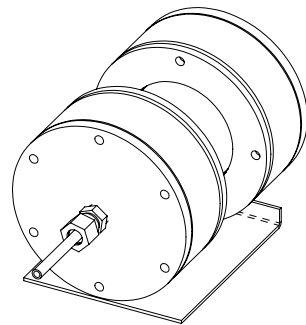
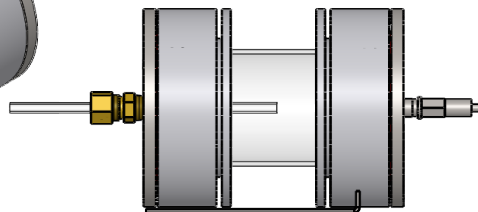
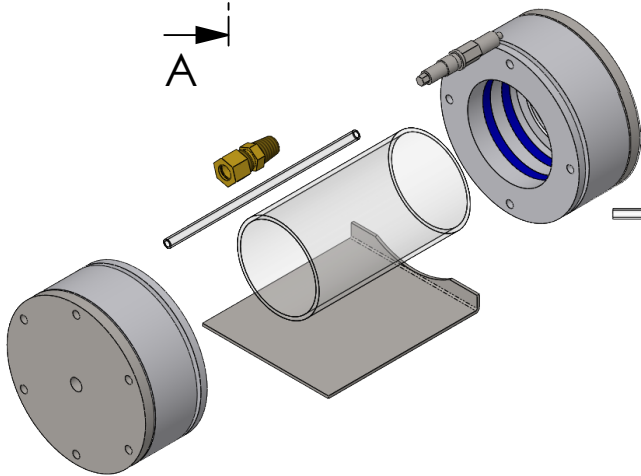
Ordering Code

	Type
• Highly sensitive force sensor M10x1, axial connection, -500 ... 500 N	9203
• Sensor for small forces M10x1, radial connection, -50 ... 50 N	9205
• Sensor for small forces M10x1, axial connection, -50 ... 50 N	9207
• Sensor for small forces M5x0.5, axial connection, -20 ... 200 N	9215A
• Sensor for small tensile and compression forces M10x1, axial connection, -500 ... 500 N	9217A

ANEXO C



SEÇÃO A-A



OBSERVAÇÕES

ACABAMENTO SUPERFICIAL	TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	BORDAS	ÁREA SUPERFICIAL M ²
	±0.1	0.3x45°	0.28
MATERIAL	VER LISTA	TRAT./ACAB.	Peso (g) 2646.64



PROJ.	HERNAN	DATA	22/09/2017
DEL.	HERNAN	DATA	04/10/2017
CONE.		DATA	

DENOMINAÇÃO

CÂMARA DE VACUO

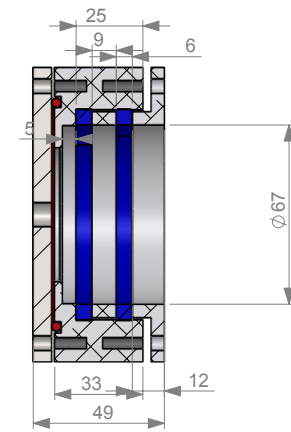
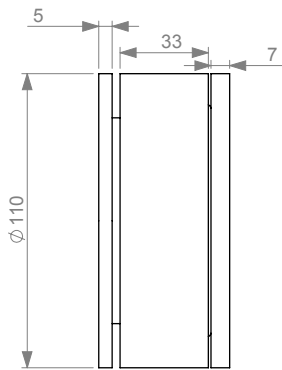
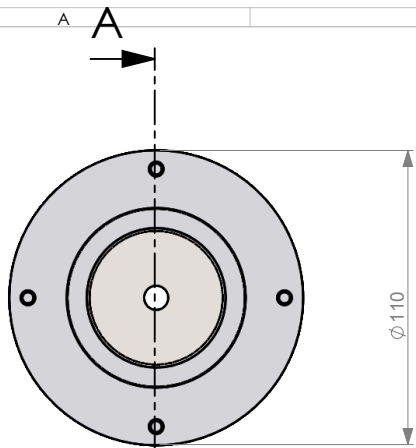
CONJUNTO

VACUO UFSC

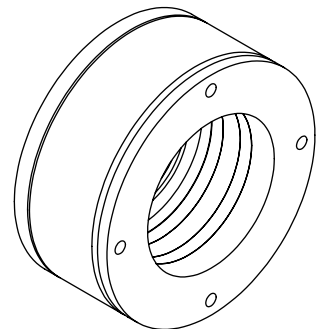
CÓDIGO/NÚMERO

526.000.401M


QUANT.	FOLHA	ESCALA	REVISÃO
1	1 / 1	1:2	1

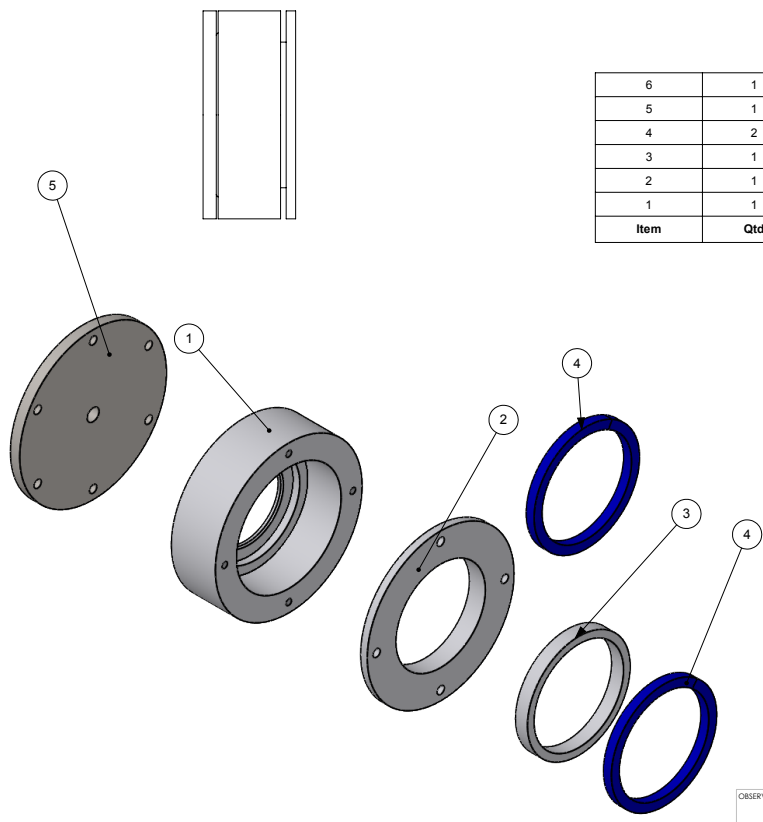


SEÇÃO A-A





IMPRESSO POR

OBSERVAÇÕES						PROJ. HERNAN	DATA
						DES. HERNAN	DATA 22/09/2017
						CONJ.	DATA
				DENOMINAÇÃO			
				FLANGE COMPLETA			
				CONJUNTO			
				VACUO			
				CÓDIGO/NÚMERO			
				526.000.405M			
				QUANT.	FOLHA	ESCALA	REVISÃO
				1	1 / 2	1:2	1
ACABAMENTO SUPERICIAL	TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	BORDAS	ÁREA SUPERICIAL M ²				
	±0.1	0.3x45°	0.10				
MATERIAL			Peso [g]				
VER LISTA			1114.99				
TRAT./ACAB.							



Item	Qty	Denominação	Código
6	1	ANEL ORING 2-314 SILICONE	15.06.013280
5	1	TAMPA DA FLANGE	526.000.110
4	2	CORDÃO SILICONE 6x6 Ø105ext	526.000.407
3	1	ANEL ALUMINIO FLANGE TB. Ø60	526.000.406
2	1	FLANGE DE APERTO	526.000.409
1	1	FLANGE ALUMINIO	526.000.408

OBSERVAÇÕES						PROJ. HERNAN	DATA
						DEL. HERNAN	DATA 22/09/2017
						CONF.	DATA
				DENOMINAÇÃO: FLANGE COMPLETA			
				CONJUNTO VACUO			
ACABAMENTO SUPERFICIAL	TOLERÂNCIA DIMENSIONAL	BORDAS	ÁREA SUPERFICIAL M ²	QUANT.	FOLHA	ESCALA	REVISÃO
	±0.1	0.3x45°	0.10	1	2 / 2	1:2	1
MATERIAL: VER LISTA				CÓDIGO/NÚMERO: 526.000.405M			
TRAT./ACAB.				Peso (g): 1114.99			