



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Construção e Ensaio Estático de um Pulsojato sem Válvulas

(Versão Final Após Defesa)

Miguel Ângelo Lopes Duarte

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo

Covilhã, fevereiro de 2020

Dedicatória

Ao meu avô, Francisco.

"It matters if you just don't give up."

Stephen Hawking

Agradecimentos

Quando nos propomos a realizar um trabalho que inclui não só uma componente teórica, mas também prática, dependemos dos conhecimentos, conselhos e ensinamentos daqueles que são os mestres do ofício, a fim de bem suceder no projeto.

Nesse sentido, gostaria de agradecer todo o apoio e disponibilidade prestada pelo meu orientador, Prof. Doutor Francisco Brójo, sobretudo pelos bons conselhos e todo o conhecimento partilhado comigo.

Além disso, não queria deixar de agradecer aos técnicos de laboratório pelo apoio durante toda a fase experimental, Sr. Rui Tomé, Doutor Nuno Sérgio e Doutor João Correia.

Ao mesmo tempo, gostaria de agradecer ao Engenheiro Cruz e também ao Sr. Jorge Lucas, pelo esforço demonstrado no processo de construção da câmara de combustão do pulsojato.

Não menos importante, quero agradecer à empresa Falusi, pela oferta do tubo de cobre com as especificações desejadas para a linha de injeção de combustível e, ainda, à empresa Móveis Região, pela oferta do sistema de calhas instalado sobre o banco de ensaios.

Um obrigado aos meus amigos Simão, Hugo e Diana por todo o apoio prestado durante a realização dos vários ensaios experimentais. Mais do que isso, um obrigado pela amizade que permanecerá.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família por ter sempre acompanhado os meus passos. Em especial, um obrigado aos meus pais pela formação e educação que me proporcionaram.

Resumo

A recuperação do conceito de propulsão pulsojato, pontualmente utilizado durante a Segunda Guerra Mundial, parece estar a conquistar, nos dias de hoje, um novo interesse no meio aeronáutico. O elevado ruído, bem como as vibrações excessivas características deste tipo de propulsão, conduziram a que a aplicação no meio aeronáutico civil viesse a ser abandonada. No entanto, a ausência total ou parcial de partes móveis, a facilidade e baixo custo de produção, têm direcionado a implementação do pulsojato para o mercado dos Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV's). Apesar de esta ser uma tecnologia com bastantes anos, ainda restam dúvidas quanto à operação e desempenho dos pulsojato, por este motivo, ainda são necessários estudos que desmistifiquem o funcionamento destes motores. No sentido de dar continuidade ao estudo numérico do dimensionamento de um motor pulsojato sem válvulas, realizado no Departamento de Ciências Aeroespaciais da UBI, a presente dissertação pretende proceder à construção física do modelo simulado numericamente, bem como avaliar o seu desempenho, através da realização de ensaios estáticos. O estudo experimental demonstrou, após exaustivas tentativas, ser necessário um aumento de 18,5 cm do ducto de escape, de forma a permitir o efeito pulsante autossustentável e, além disso, uma adição de 4,7 cm no ducto de admissão, no sentido de torná-lo acelerável. Esta investigação permitiu perceber também, a importância do divergente instalado sobre a tubeira de escape, pois sem este componente a combustão autossustentada não se verifica. De forma a testar o comportamento do pulsojato em diferentes cenários, sete caudais mássicos de propano foram injetados ao longo do ducto de admissão: 1,4, 1,8, 3,3, 3,9, 4,6, 7,1 e 7,7 g/s. Para cada um dos testes, foram gravados os dados relativos à tração, temperatura da admissão, escape e câmara de combustão, frequência e nível de pressão sonora. A tração estática máxima produzida pelo pulsojato foi de 26,14 N, superando os 24,80 N obtidos nas simulações numéricas, ainda assim, este valor ficou aquém dos 58,90 N idealizados para o motor. A frequência operacional do pulsojato sem válvulas variou de 111 a 125 Hz, consoante o caudal mássico injetado. Durante os testes experimentais verificou-se que, mesmo com dois reservatórios de propano em paralelo e com acelerador totalmente aberto, a combustão autossustentada no interior do pulsojato permaneceu ativa. Isto indicia que, se caudais mais elevados fossem testados, a força de tração seria, eventualmente, amplificada.

Palavras-chave

Pulsojato, Pulsojato não valvulado, Pulsojato tipo *Chinesa*, Propano, Motor de Deflagração por Pulsos.

Abstract

The recovery of the pulsejet propulsion concept, widely used during World War II, seems to be winning nowadays a new interest in aeronautical environment. The high noise and excessive vibrations, characteristic of this type of propulsion, led to the separation from civil aviation. However, the possibility of having no moving parts, a very simple construction and a low cost, have driven the implementation of pulsejet to the Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) market. Although this technology has been developed many years ago, operation and performance of pulsejets is still not fully understood. For this reason, studies are required to explain the operation of these engines. In order to continue the numerical study of design of a valveless pulsejet engine, carried out at UBI Aerospace Science Department, this dissertation intends to manufacture the virtual model, as well as evaluate its performance through static runs. The experimental study showed, after exhaustive attempts, that 18.5 cm of the exhaust duct should be added in order to allow the self-sustaining pulsating effect, and 4.7 cm to the intake duct, in order to make it throttleable. This investigation also allowed to understand the importance of the flare installed on the exhaust nozzle, since without this component self-sustained combustion does not occur. In order to test the valveless pulsejet behavior in different scenarios, seven propane flow rates were injected along the intake duct: 1.4, 1.8, 3.3, 3.9, 4.6, 7.1 and 7.7 g/s. For each run, data acquisition included thrust recording, inlet temperature, exhaust temperature, combustion chamber temperature, operational frequency, and sound pressure level. The maximum static thrust produced by the engine was 26.14 N, exceeding the 24.80 N obtained in numerical simulations. Unfortunately, the 58.90 N expected for the engine was not reached. The operating frequency of valveless pulsejet ranged from 111 to 125 Hz, depending on the injected mass flow rate. During the experimental tests it was found that even with two propane tanks and full throttle condition, self-sustaining combustion remained active. This indicates that if higher flow rates were tested, thrust would eventually be increased.

Keywords

Pulsejet, Valveless Pulsejet, Chinese Pulsejet, Propane, Pulse Deflagration Engine.

Índice

1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo da Investigação	2
1.3 Metodologia e Estruturação	2
2 Apanhado Histórico e Estudos Significativos	5
2.1 Contexto Histórico	5
2.2 Revisão Bibliográfica	9
3 Fundamentos Teóricos	13
3.1 Pulsojato	13
3.2 Pulsojato com Válvulas	13
3.3 Pulsojato sem Válvulas	15
3.3.1 Tipos de Pulsojatos sem Válvulas	16
3.4 Motor de Detonação por Pulso	18
3.5 Ciclo Operacional	20
3.6 Ciclo Termodinâmico	21
3.6.1 Ciclo de Lenoir	22
3.6.2 Ciclo de Humphrey	23
3.7 Tração Estática Máxima	25
3.8 Frequência de Operação	26
3.9 Como iniciar um Pulsojato	27
3.9.1 Combustível	27
3.9.2 Ar Comprimido	28
3.9.3 Fonte de Ignição	28
3.10 Pulsojato Relativamente a Outros Sistemas Propulsivos	29
3.11 Melhorar o Desempenho de um Pulsojato	30
4 Instalação Experimental	33
4.1 Configuração Inicial do Pulsojato	33
4.2 Construção do Pulsojato	34
4.2.1 Admissão	34
4.2.2 Câmara de Combustão	34
4.2.3 Escape	35
4.3 Banco de Ensaios	36
4.4 Sistemas Complementares	37
4.4.1 Sistema de Ignição	37
4.4.2 Sistema de Injeção de Combustível	38
4.4.3 Sistema de Ar Comprimido	39
4.5 Problemas Operacionais	39

4.5.1	Ignição	39
4.5.2	Efeito Pulsante Autossustentável	39
4.5.3	Tração Constante	41
4.6	Configuração Final do Pulsojato	42
5	Ensaios e Resultados Experimentais	43
5.1	Instrumentos de Aquisição de Dados	43
5.1.1	Pressão Ambiente	43
5.1.2	Temperatura	44
5.1.3	Tração	44
5.1.4	Caudal Mássico de Combustível	45
5.1.5	Nível de Pressão Sonora	46
5.2	Filtro de Kalman Aplicado às Medições	46
5.3	Procedimento Experimental para Aquisição de Dados	48
5.4	Resultados	49
5.4.1	Caudal Mássico de C_3H_8	49
5.4.2	Temperatura	50
5.4.3	Tração	53
5.4.4	Consumo de Combustível	56
5.4.5	Frequência	57
5.4.6	Nível de Pressão Sonora	58
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Trabalhos Futuros	63
A	Código em Arduino	69
B	Retas de calibração dos Sensores	73
B.1	Célula de Carga para Medição da Tração	73
B.2	Célula de Carga para Medição do Caudal Mássico de C_3H_8	73
B.3	Sensor de Pressão absoluta-MAP	74
C	Desenhos Técnicos	75
C.1	Pulsojato	75
C.2	Banco de Ensaios	76
C.3	Plataforma para Medição do Caudal de Propano	77
C.4	Divergente do Ducto de Admissão	78
C.5	Divergente do Ducto de Escape	79
D	Aparato Eletrónico	81

Lista de Figuras

Figura 2.1- V-1 “Buzz Bomb” (Adaptado de [3]).	6
Figura 2.2- Pulsojato Escopette [6].	6
Figura 2.3- Pulsojato Lockwood-Hiller [7].	7
Figura 2.4- Modelos de recuperador, estudados por Kentfield (Adaptado de [6]).	7
Figura 2.5- Pulsojato com tecnologia PETA (adaptado de [10]).	8
Figura 2.6- Geometria e tomadas de pressão e temperatura do pulsojato de 15 cm (adaptado de [19]).	10
Figura 2.7- Pressão e tração medidas para o pulsojato (admissão de 2,54 cm e 22,5 cm de comprimento global) (adaptado de [19]).	10
Figura 2.8- Pulsojato com admissão voltada para a frente (a) e voltada para trás (b) (adaptado de [20]).	11
Figura 2.9- Vetor Velocidade no interior do pulsojato com obstrução em escoamento animado a 80 m/s (adaptado de [24]).	12
Figura 3.1- Passagem do escoamento pela abertura de uma válvula de palheta [26].	14
Figura 3.2- Operação do pulsojato com válvulas (adaptado de [2]).	14
Figura 3.3- Válvula em forma de pétala (adaptado de [25]).	14
Figura 3.4- Válvula de palheta deformada [26].	15
Figura 3.5- Pulsojato sem válvulas (adaptado de [27]).	16
Figura 3.6- Pulsojato Marconnet (adaptado de [28]).	17
Figura 3.7- Pulsojato sem válvulas Escopette (adaptado de [28]).	17
Figura 3.8- Pulsojato Lockwood-Hiller, com aumentadores de tração (adaptado de [28]).	17
Figura 3.9- Pulsojato Chinês (adaptado de [6]).	18
Figura 3.10- Thermojet [6].	18
Figura 3.11- Pulsojato sem válvulas desenvolvido por Kentfield [30].	18
Figura 3.12- <i>Turbofan-PDE</i> híbrido (adaptado de [27]).	19
Figura 3.13- Ciclo operacional de um pulsojato (adaptado de [32]).	20
Figura 3.14- Comparação entre ciclo Otto e Diesel ideal (adaptado de [35]).	21
Figura 3.15- Ciclo ideal de Lenoir (adaptado de [34]).	22
Figura 3.16- Ciclo ideal de Humphrey (adaptado de [2]).	23
Figura 3.17- Mecanismo de injeção intermitente de combustível [30].	30
Figura 3.18- Princípio de funcionamento de um aumentador de tração.	31
Figura 4.1- Dimensões iniciais do pulsojato, em mm.	33
Figura 4.2- Planos da admissão após serem calandrados.	34
Figura 4.3- Câmara de Combustão.	35
Figura 4.4- Ducto de Escape.	35
Figura 4.5- Pulsojato instalado sobre o banco de ensaios.	36
Figura 4.6- Sistema de ignição.	37

Figura 4.7- Sistema de injeção de combustível.	38
Figura 4.8- Novo injetor desenvolvido.	40
Figura 4.9- Configuração final do pulsojato, em mm.	42
Figura 5.1- Sensor de pressão absoluta-PBT-GF30.....	43
Figura 5.2- Localização dos termopares: a) -Câmara de combustão; b) -Admissão; c) - Escape.	44
Figura 5.3- Célula de carga DYLY-103, limitada a 10 kg	45
Figura 5.4- Plataforma para medição do caudal mássico de combustível.	45
Figura 5.5- Sonómetro SW-524.	46
Figura 5.6- Algoritmo genérico do filtro de Kalman.....	47
Figura 5.7- Filtro de Kalman, aplicado ao conjunto das medições.....	47
Figura 5.8- Aparato Experimental para a aquisição de dados.	49
Figura 5.9- Massa do tanque de propano com o tempo, ensaio $n^{\circ}1$	50
Figura 5.10- Evolução das temperaturas de admissão, escape e câmara de combustão, no ensaio $n^{\circ}1$	51
Figura 5.11- Evolução da temperatura para diferentes condições de aceleração.	52
Figura 5.12- Pulsojato durante um ensaio estático.	52
Figura 5.13- Força de tração, durante o ensaio $n^{\circ}1$	53
Figura 5.14- Tração produzida com o caudal mássico de combustível injetado.	54
Figura 5.15- Correspondência entre a temperatura da câmara de combustão e a tração.....	55
Figura 5.16- Tração máxima obtida pelo pulsojato.	55
Figura 5.17- Exemplo de determinação da frequência operacional de 111 Hz, através do Audacity 2.3.3.	57
Figura 5.18- Frequência Experimental vs. Frequência Calculada.	57
Figura 5.19- Nível de Pressão Sonora.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Aeronaves históricas com propulsão pulsojato.	8
Tabela 5.1- Propriedades do ar ambiente.	48
Tabela 5.2- Consumo específico de tração (TSFC) do pulsojato.	56

Lista de Acrónimos

USAAF	United States Army Air Forces
JB	Jet Bomb
PJ	Pulse Jet
SNECMA	Société Nationale d'Étude et de Construction de Moteurs d'Aviation
MTOW	Maximum Take-Off Weight
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
PETA	Pulse Ejector Thrust Augmenter
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
LAMV	Light Aerial Multi-purpose Vehicle
CFD	Computational Fluid Dynamics
PDE	Pulse Detonation Engine
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
PCB	Printed Circuit Boards
UBI	Universidade da Beira Interior
MIG	Metal Inter Gas
MAP	Manifold Absolute Pressure
TSFC	Thrust-Specific Fuel Consumption

Nomenclatura

M	Número de Mach	[-]
P	Pressão	[Pa]
T	Temperatura	[K]
\dot{m}_a	Caudal mássico de ar	[g/s]
\dot{m}_f	Caudal mássico de Combustível	[g/s]
c_{P_c}	Calor específico a pressão constante (gases frios)	[J/(kg.K)]
c_{P_h}	Calor específico a pressão constante (gases quentes)	[J/(kg.K)]
Q_R	Poder Calorífico do combustível	[J/kg]
$r_{c/a}$	Razão entre o caudal mássico de combustível e ar	[-]
U	Velocidade de voo	[m/s]
U_e	Velocidade de escape	[m/s]
F	Força de Tração	[N]
$TSFC$	Consumo específico de tração	[kg/(N.h)]
L	Comprimento total do Pulsojato	[m]
L_a	Comprimento da admissão	[m]
L_e	Comprimento do escape	[m]
S_a	Área transversal do ducto de admissão	[m ²]
V	Volume total do pulsojato	[m ³]
V_{cc}	Volume da câmara de combustão	[m ³]
f	Frequência do Pulsojato	[Hz]
f_a	Frequência da admissão	[Hz]
f_e	Frequência do escape	[Hz]
c	Velocidade do som	[m/s]
c_a	Velocidade do som da admissão	[m/s]
c_e	Velocidade do som do escape	[m/s]

Letras gregas

γ_c	Índice adiabático (gases frios)	[-]
γ_h	Índice adiabático (gases quentes)	[-]
η_d	Rendimento da admissão	[-]
η_b	Rendimento da combustão	[-]
Δt	Período de tempo	[s]
λ	Comprimento de onda	[m]

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Motivação

Atualmente, no meio aeronáutico, existem vários sistemas de propulsão que permitem contrariar e vencer a força de resistência aerodinâmica, responsável pela desaceleração do veículo em voo atmosférico e, também, por acelerá-lo a partir do repouso. Atendendo ao tipo de missão, os sistemas de propulsão mais comuns acoplados à aeronave são, a propulsão a hélice (acionamento a pistão ou turbo-hélice), turbojato e turbofan. Apesar destes sistemas terem mais do que provas dadas quanto ao seu desempenho e eficiência, o elevado número de partes mecânicas móveis que integram o seu interior, provocam que a sua manufatura seja bastante complexa e exija uma manutenção exaustiva. Neste sentido, foi utilizado durante a Segunda Guerra Mundial, um novo conceito de produção de tração, designado por propulsão pulsojato, visto como um desenvolvimento intermédio entre os motores a pistão e propulsores a gás.

Pelo facto de conter um número muito reduzido de partes móveis, ou até totalmente desprovido das mesmas no caso de pulsojatos não valvulados, faz com que este tipo de propulsores sejam, recentemente, uma atração para um dos mercados que mais rapidamente tem crescido, o dos veículos aéreos não tripulados. As elevadas vibrações, o ruído intenso, bem como o elevado consumo de combustível característico deste tipo de motores [30], provocaram o afastamento desta tecnologia da aviação civil, no entanto, no caso dos veículos não tripulados, a simplicidade e baixo custo de construção destes propulsores, podem ultrapassar estas limitações.

Nos dias que correm, é clara a forte pesquisa que tem vindo a ser realizada no sentido de integrar a propulsão elétrica em plataformas móveis não tripuladas, no entanto, as limitações face ao armazenamento de energia, comprometem ainda a sua implementação. Até ao momento, a reduzida densidade energética das baterias elétricas necessárias, por exemplo, à realização de missões de maior alcance, implica um acréscimo significativo da massa total da aeronave à descolagem. Desta forma, enquanto se aguarda pelo desenvolvimento de tecnologias que permitam armazenar energia eficientemente, a recuperação da ideia de propulsão pulsojato poderá ser uma alternativa viável, motivada pela evolução de materiais cada vez mais leves e resistente a ambientes de alta temperatura.

1.2 Objetivo da Investigação

A presente investigação surge no seguimento de um trabalho de dissertação, desenvolvido no Departamento de Ciências Aeroespaciais da UBI, em que se procedeu ao dimensionamento de um pulsojato sem válvulas e, posteriormente, à análise numérica do seu desempenho para dois tipos de combustíveis diferentes, através de software CFD. Posto isto, no atual projeto, pretende-se construir o modelo previamente dimensionado e, além disso, testar os parâmetros operacionais que o caracterizam para diferentes caudais mássicos. Desta forma, será possível entender até que ponto os resultados provenientes da simulação numérica podem diferir dos coletados experimentalmente.

Um trabalho adjacente a esta dissertação, passará por reunir literatura capaz de descrever os princípios da propulsão por pulsos, a fim de entender melhor o comportamento dos motores pulsojato. Assim, uma vez obtidos os dados relativos ao propulsor em estudo, será possível testar a veracidade de alguns dos conceitos teóricos descritos pela bibliografia.

Dada a dificuldade em iniciar o funcionamento dos pulsojatos não valvulados sem o suplemento de ar comprimido, tem-se em vista compreender quais os principais fatores que mais comprometem e afetam o alcance do efeito pulsante autossustentável.

Além do mais, para a captura dos dados experimentais relativos à operação do motor, planeia-se construir um banco de ensaios que permita o ensaio estático do motor, através de um conjunto de sensores capazes de registar os parâmetros de funcionamento. Em adição, este aparato poderá ser utilizado futuramente na análise de propulsores a gás de pequenas dimensões.

Por último, ambiciona-se descrever todos os procedimentos e decisões tomadas ao longo do projeto, no sentido que possam orientar, no futuro, quem pretenda construir um pulsojato sem válvulas.

1.3 Metodologia e Estruturação

No sentido de alcançar cada um dos objetivos intencionados para esta dissertação, o documento encontra-se dividido em vários capítulos que visam, também, facilitar o entendimento da ordem cronológica adotada para este trabalho.

O capítulo inicial contextualiza a atual investigação, revelando qual a motivação e os principais objetivos a que o autor se propõe.

No segundo capítulo é feito, num primeiro momento, um apanhado histórico que tem por intenção mostrar o enquadramento histórico em que surgiu o motor pulsojato, desde os primórdios até aos modelos mais atuais. Além do mais, são expostos exemplos de aeronaves que fizeram uso da propulsão pulsojato. Num segundo momento, apresentam-se alguns dos

estudos científicos que têm, de certa forma, permitido compreender o comportamento do pulsojato.

O terceiro capítulo tem por objetivo dar a conhecer os conceitos teóricos afetos à operação de um pulsojato. Com esta revisão geral, acerca do funcionamento de motores de deflagração por pulsos, é possível apreender de que forma são calculados alguns dos parâmetros de desempenho deste tipo de propulsores.

O quarto capítulo descreve todo o procedimento seguido para a construção física, quer do pulsojato sem válvulas, quer do banco de ensaios, fundamental à recolha de dados de desempenho. Em adição, são desvendados alguns dos problemas operacionais que conduziram a modificações no propulsor inicialmente proposto.

No quinto capítulo, para além de enumerarem-se os vários sensores que permitiram a aquisição dos dados relativos ao comportamento do pulsojato não valvulado são, também, apresentados e discutidos todos os resultados experimentais obtidos.

Finalmente, no último capítulo, é feita uma apreciação global ao trabalho desenvolvido, no sentido de entender quais os objetivos que foram efetivamente alcançados, bem como algumas considerações a melhorar. Numa perspetiva de dar continuidade ao trabalho realizado, são apresentadas propostas de temas a desenvolver no futuro.

Capítulo 2

2 Apanhado Histórico e Estudos Significativos

Toda a invenção é marcada por um começo que fica gravado num determinado período da história e, relativamente ao pulsojato, não é exceção. Apesar do início deste propulsor remeter para o século XX, o passar dos anos contribuiu para que vários conceitos e técnicas transformassem o modelo primitivo. Em seguida, para além de uma descrição da evolução histórica do motor de explosão pulsante, serão expostas algumas das investigações que têm permitido entender o que afeta o desempenho de um pulsojato.

2.1 Contexto Histórico

O pulsojato tem um passado bastante evolutivo, tendo a participação de diversos indivíduos contribuído para o desenvolvimento e inovação do mesmo. A história não esclarece quem foi o pioneiro do motor pulsojato, estando a discussão entre o oficial russo Nikolaj Teleshov e o inventor sueco Martin Wiberg, no início do século XX. A primeira patente surgiu em 1906 pelo engenheiro V.V.Karadovin, também ele russo, que desenvolveu um motor de alta frequência através da combustão cilíndrica de uma mistura de combustível líquido e ar [1].

Georges Marconnet inventou, em 1907, o pulsojato sem válvulas em França [2], sendo constituído por um difusor na admissão, câmara de combustão, e uma tubeira de escape extensa de forma a expulsar os gases de escape resultantes da combustão.

Um inventor e projetista alemão Paul Schmidt projetou, em 1939, a bomba voadora V-1 cujo desenho inicial continha o pulsojato no interior da fuselagem tendo posteriormente optado por colocar este sistema propulsivo sobre a fuselagem (ver Figura 2.1) [3]. Em colaboração com a companhia Argus, o pulsojato foi aperfeiçoado permitindo que em dezembro de 1942 fosse possível o primeiro voo da V-1 “Buzz Bomb”, assim designada pelo elevado ruído sonoro que a caracterizava. É uma bomba não tripulada, com mais de 2 toneladas de massa, dirigida por um giroscópio, que colidia com o solo quando se extinguia o combustível a bordo. Esta era capaz de gerar cerca de 2900 N de tração a uma altitude próxima de 1 km e uma velocidade de cruzeiro superior a 640 km/h [4]. O seu lançamento poderia ser feito através de uma rampa inclinada de 46 m ou simplesmente lançada ao ar a partir de uma aeronave de carga. O V-1 foi o primeiro míssil de cruzeiro, tendo sido amplamente utilizado nos bombardeamentos durante a Segunda Guerra Mundial, nomeadamente na Inglaterra e Bélgica [3].



Figura 2.1- V-1 “Buzz Bomb” (Adaptado de [3]).

Próximo do final da Segunda Guerra Mundial, em 1944, os destroços do V-1 foram capturados pelos Estados Unidos permitindo que estes aprofundassem os conhecimentos neste novo conceito de propulsão. Isto conduziu a que a indústria americana e a USAAF construíssem o seu próprio modelo de míssil de cruzeiro designado Jet Bomb 2, equipado com um motor pulsojato PJ-31 produzido pela Ford. À semelhança do V-1, o JB-2 era colocado no ar quer através de bombardeiros quer através de uma rampa de lançamento com um propulsor auxiliar de combustível sólido acoplado a bordo [2]. No mesmo ano, 1944, o pulsojato chega ao Japão permitindo construir aeronaves guiadas por pilotos a bordo concebidas para ataques suicidas- Yokosuka MXY7 Ohka [5].

Em 1940, o pulsojato de Marconnet é modificado pelo tenente William Schubert, da marinha dos Estados Unidos, originando o “*resojet*”. A principal diferença consistia na expansão repentina da entrada da câmara de combustão capaz de gerar maior turbulência e, por isso, maior capacidade de mistura do escoamento ar/combustível, isto é, tornar a combustão mais eficiente. Além disso, a geometria da admissão foi reformulada de forma a impedir que os gases pós combustão escapem antes da pressão interna da câmara de combustão ser inferior à atmosférica [2].

Uma década mais tarde, em 1950, surge por um grupo de engenheiros da companhia SNECMA o Escopette, cuja admissão voltada para trás característica deste motor fornecia um aumento substancial de tração pelo efeito de reversão do escoamento [1], Figura 2.2. Além disso, a tubeira propulsiva não se limitava a um tubo reto de secção constante, mas sim segmentado em diferentes estágios de secção crescente favorável à formação de diferentes ondas de compressão e rarefação por cada ciclo de explosão [6].

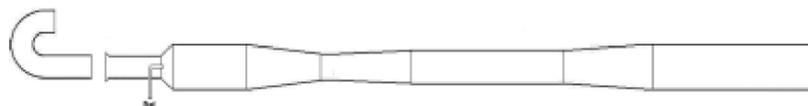


Figura 2.2- Pulsojato Escopette [6].

No início da década seguinte, 1960, Lockwood em colaboração com a companhia Hiller inventou um dos modelos mais eficazes da história, o pulsojato em forma de “U”. Este tipo de motor apresentava geometria de área variável ao longo da sua estrutura, sendo a admissão feita através do tubo reto mais curto, enquanto a tubeira curva servia para o escape dos gases, Figura 2.3. Além disso, o motor Lockwood-Hiller distinguia-se por permitir a instalação de aumentadores de tração, tanto na frente da admissão, como no final da tubeira de escape e, desta forma, aumentar o rendimento do pulsojato. Um dos protótipos desenvolvidos, modelo HH 5.25-7, foi capaz de produzir uma tração máxima de 1335 N, com uma massa de cerca de 14 kg [7].

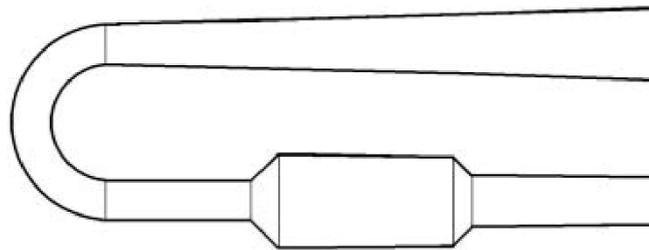


Figura 2.3- Pulsojato Lockwood-Hiller [7].

Entre os anos 70 e 80, John Kentfield conseguiu aumentar a tração gerada pelo pulsojato através da adição de uma estrutura designada de recuperador. Em vez de um ducto dobrado para trás, ele instalou um cone suavemente curvado que permitia que o ar fresco fosse sugado pelo fluxo de gás quente, potenciando um aumento de tração secundário. Vários modelos de recuperador foram testados por Kentfield, sendo que a maioria apresentava palhetas no interior para controlar o escoamento e, com isso, diminuir a turbulência. Na Figura 2.4 constam dois dos modelos estudados, tendo o investigador chegado à conclusão de que o modelo mais simples à direita (b) superou o modelo (a) devido à operação intermitente de um motor pulsojato originar demasiadas perdas quando o ar fresco é aspirado numa direção retilínea. Com a admissão lateral, o ar era mais facilmente acelerado [6].

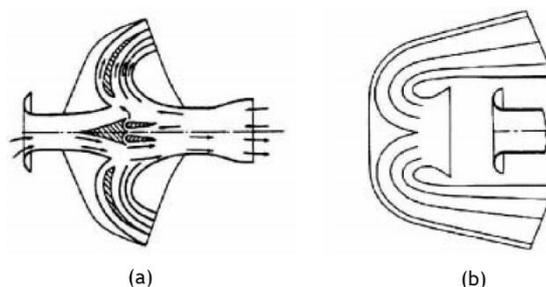


Figura 2.4- Modelos de recuperador, estudados por Kentfield (Adaptado de [6]).

Uma das abordagens mais recentes ao motor pulsojato foi feita pela fabricante americana Boeing. Através do projeto tecnológico designado PETA, Figura 2.5, a multinacional sugere o uso da propulsão pulsojato em aeronaves de aterragem e descolagem vertical (VTOL). Através da introdução do motor pulsojato no interior de um ducto, à medida que o escoamento é

libertado pela tubeira de escape existe um maior arrastamento de ar do que o necessário à sua operação normal conseguindo-se, desta forma, aumentar a tração e melhorar o arrefecimento do motor [8]. A *Boeing* tenciona implementar esta tecnologia a bordo da LAMV, uma aeronave protótipo que descola e aterriza verticalmente com um conjunto de propulsores pulsojato [9].

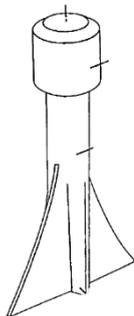


Figura 2.5- Pulsojato com tecnologia PETA (adaptado de [10]).

Na história da aeronáutica foram várias as tentativas de acoplar os motores pulsojato a aeronaves como meio de propulsão, sendo a maioria de aplicação militar devido ao elevado nível de ruído gerado. A Tabela 2.1 resume as principais aeronaves que fizeram uso deste tipo de propulsão.

Tabela 2.1- Aeronaves históricas com propulsão pulsojato.

	XH-26 Jet Jeep	Blohm Voss BV P.213	Kawanishi Baika	Junkers Ju EF 126
Massa (MTOW)	320 kg	1560 kg	1430 kg	2800 kg
Velocidade máxima	175 km/h	700 km/h	648 km/h	780 km/h
Primeiro voo	1952	-	-	-
Tripulação	1	1	1	1
Missão	Observação e reconhecimento	Combate	Ataque suicida	Combate
Aplicação	Militar	Militar	Militar	Militar
	 [11]	 [12]	 [13]	 [14]

Apesar da simplicidade de concepção e baixo custo de produção, fatores como o elevado consumo de combustível [2], impactos acústicos e problemas resultantes da vibração induzida pelo motor pulsojato [15] contribuíram para que este conceito de propulsão fosse parcialmente abandonado tanto da aviação civil como militar. Contudo, com a crescente popularidade dos veículos aéreos não tripulados (UAV), o pulsojato tem-se revelado uma ótima solução para estas aeronaves mais pequenas e leves, dado a simplicidade e baixo custo do mesmo [16].

2.2 Revisão Bibliográfica

Embora o motor pulsojato tenha tido a sua maior popularidade por volta do século XX, não impede que um dos motores a reação mais simples alguma vez construído seja, ainda hoje, alvo de estudo no sentido de melhorar a sua eficiência e desempenho.

Vários têm sido os estudos realizados no sentido de entender o ciclo de funcionamento de um pulsojato a fim de melhorar o seu desempenho. Tao et al. [23] e Wenxiang et al. [18] executaram simulações numéricas a um pulsojato sem válvulas que permitiram compreender que a mistura ar-combustível é inflamada pelos produtos da combustão, a elevadas temperaturas, produzidos no ciclo de combustão anterior que, por sua vez, permite a autossustentabilidade do efeito pulsante. Além disso, averiguaram que a exaustão dos gases de escape provoca um processo de sucção responsável por admitir ar para o interior da câmara de combustão, fazendo com que o pulsojato seja naturalmente aspirado.

Paxson et al. [17] realizaram uma investigação experimental em que foi medida a tração e o fluxo de massa pela instalação de diferentes ejetores a jusante de um motor pulsojato alimentado a gasolina. Foram testados três ejetores de diferente geometria, comprimento e diâmetro, sendo que também foi estudada a influência no desempenho da distância entre a saída do ducto de escape e a entrada do ejetor. Como tal, demonstraram que o comprimento ideal do ejetor não é dimensionado com o raio do mesmo, o aumento de tração mais significativo é conseguido com a entrada do ejetor próximo da saída do pulsojato, para além de evidenciarem que o fluxo de massa e a tração não estão intimamente relacionados, ao contrário do que é habitualmente suposto.

Wenxiang et al. [18] averiguaram de que forma a variação do comprimento da tubeira propulsiva e da câmara de combustão comprometem o desempenho de um motor pulsojato. Para tal, implementaram uma simulação numérica, através de um programa CFD (CFX™ 11.0), a um pulsojato sem válvulas de 830 mm de comprimento alimentado com gás propano com um caudal mássico constante de 0,4 g/s. As simulações realizadas permitiram aos autores concluir que a frequência do pulsojato aumenta com a diminuição do comprimento da câmara de combustão e, por outro lado, existe um comprimento característico capaz de minimizar a frequência para o caso do ducto de saída. Além do mais, testemunharam que uma diminuição do comprimento da câmara superior a 30 mm provoca um aumento súbito da frequência do propulsor.

Um dos estudos mais exaustivos encontrados na bibliografia é, na opinião do autor, realizado por Geng et al. [19], pois várias hipóteses são postas em causa. Nesta investigação foram medidas a temperatura, pressão, tração e a frequência de operação em função da variação do comprimento e geometria dos ductos de admissão e exaustão para um pulsojato de 15 cm de comprimento. Para realizar este estudo, foi necessário construir um banco de ensaios capaz de

recolher os dados do motor a reação. A Figura 2.6 apresenta as dimensões, bem como as diferentes tomadas de pressão e temperatura instaladas.

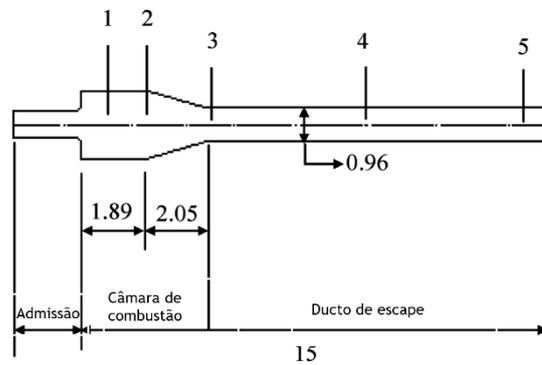


Figura 2.6- Geometria e tomadas de pressão e temperatura do pulsojato de 15 cm (adaptado de [19]).

Na Figura 2.7 expõem-se o resultado de um dos ensaios realizados que reflete a tendência sinusoidal da pressão, medida através da tomada 2, e da tração, medida com uma célula de carga a jusante da tubeira de escape.

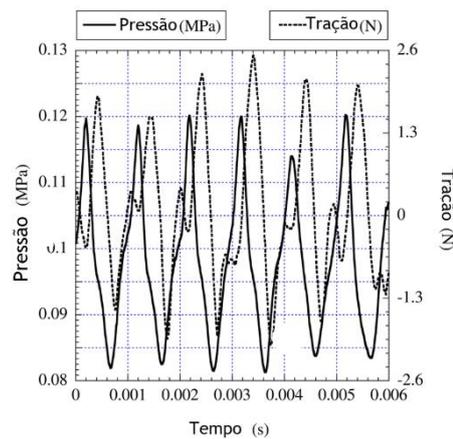


Figura 2.7- Pressão e tração medidas para o pulsojato (admissão de 2,54 cm e 22,5 cm de comprimento global) (adaptado de [19]).

Numa fase inicial, foi realizado um teste de dimensionamento que demonstrou os comprimentos da admissão e escape estarem intimamente relacionados, sendo que reduzir o comprimento total do motor a reação implica reduzir também a dimensão da admissão, para que a combustão autossustentada não seja comprometida. Além disso, os autores confirmaram que a frequência do propulsor sem válvulas diminuiu com o aumento do comprimento total, tal como demonstrado por Wenxiang et al. [18]. O caudal mássico de combustível, neste caso hidrogénio devido à pequena escala do pulsojato, foi medido para diferentes configurações da admissão manifestando os resultados que, para a menor razão entre a área de admissão e da câmara de combustão, 0,04, regista-se o menor fluxo de combustível e este é relativamente insensível à alteração dos comprimentos dos ductos de admissão e escape. Ainda a orientação da admissão

foi variada em 90°, 135° e 180° em relação ao eixo paralelo ao comprimento da tubeira de escape, tendo o efeito pulsante sido alcançado em todos os casos. Outra constatação a reter é que, combustíveis com combustão lenta, como propano, não permitem a operação de pulsojatos de pequena escala.

Na tentativa de entender a influência da disposição da admissão no desempenho, Geng et al. [20] realizaram uma abordagem combinada experimental e numérica de um pulsojato de 8 cm, sem válvulas, com duas configurações de entrada: voltada para a frente e voltada para trás, Figura 2.8.

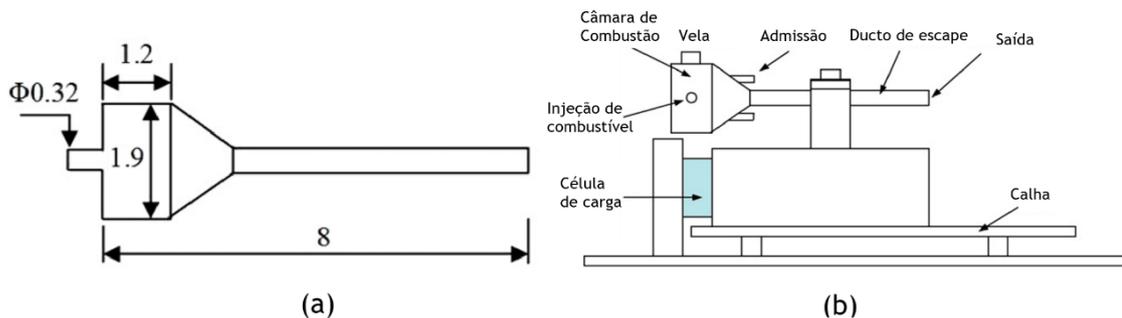


Figura 2.8- Pulsojato com admissão voltada para a frente (a) e voltada para trás (b) (adaptado de [20]).

Deste modo, os autores constataram que a frequência de operação e a pressão máxima são função do caudal de combustível, hidrogénio no caso. Assim, num regime de baixo caudal mássico de combustível, a frequência e a pressão são reduzidas aumentando com o aumento desse mesmo caudal. Para a admissão voltada para montante, a frequência e a pressão registam um máximo com o fluxo de combustível enquanto que, no caso com a admissão voltada para jusante, a frequência aumenta sucessivamente com o caudal mássico e a pressão maximiza em valores inferiores de fluxo de combustível e mantém-se. Quanto à tração, aferiram que pulsojatos com a admissão voltada para trás conseguem um incremento de aproximadamente 1 N relativamente aos aspirados pela frente, apesar de ainda assim serem pouco eficientes. Acrescentar que este trabalho mostrou que, ao contrário dos pulsojatos com válvulas cuja frequência depende somente do comprimento do motor a reação, os pulsojatos sem válvulas dependem também do comprimento da admissão.

Nakano et al. [21] examinaram qual a influência do escoamento externo na operação do pulsojato, através de testes realizados em túnel de vento. Para isso, foi testado um pulsojato com válvulas de 80 cm de comprimento e um ducto de 3,4 cm de diâmetro, alimentado a gasolina, equipado com um sistema ativo de controlo de ar na admissão. Os resultados revelaram que o pulsojato com válvulas diminui a tração gerada à medida que aumenta a velocidade do voo uma vez que aumenta o fluxo de ar fornecido para o interior da câmara de

combustão. Além disso, o sistema de controlo do fluxo de ar na admissão permitiu uma redução do consumo de combustível superior a 20%.

Um modelo acústico capaz de prever a frequência de um pulsojato sem válvulas foi desenvolvido por Zheng et al. [22]. Uma investigação combinada experimental e numérica permitiu entender que a frequência depende da velocidade média do som, ditada pela temperatura, e da geometria da admissão e da tubeira propulsiva. O modelo acústico desenvolvido previu que a frequência operacional de um pulsojato é dada pela média entre a frequência calculada para admissão e ducto de escape sendo que, quando estas duas se igualam, a máxima tração gerada é obtida. Por outro lado, se a diferença entre ambas as frequências ultrapassar um valor crítico, a operação do pulsojato é interrompida. Estudos feitos permitiram verificar que o aumento do diâmetro do ducto de admissão diminui a temperatura à entrada apesar de aumentar a temperatura de escape e o fluxo de ar no interior do motor a reação. Desta forma, a diminuição da temperatura de admissão sugere que haja uma redução dos produtos da combustão expelidos pela admissão com o aumento do diâmetro da entrada.

Simulações numéricas realizadas por Zheng et al. [24] permitiram verificar que um pulsojato sem válvulas, quando operado num escoamento externo com elevada velocidade, pode aspirar ar diretamente da entrada para a tubeira propulsiva atravessando a câmara de combustão, sem que este tenha qualquer participação no processo de combustão. Nesse sentido, foi colocada uma obstrução no interior da câmara de combustão (Figura 2.9) capaz de aumentar a vorticidade e, por isso, a capacidade de mistura do escoamento interno. Os resultados mostraram que, para um pulsojato de 15,2 cm de comprimento, operado num escoamento com 80 m/s, consegue-se um aumento de tração de 0,61 N para 1,6 N com a obstrução do final da câmara. Além disso, esta obstrução não provoca alteração da frequência da admissão e escape, ou seja, não destrói a uniformização de ambas permitindo, segundo Zheng et al. [22], a máxima tração. Os resultados das simulações em ambiente estático revelaram que a introdução de uma perturbação no interior da câmara de combustão não provoca alterações significativas na pressão e tração.

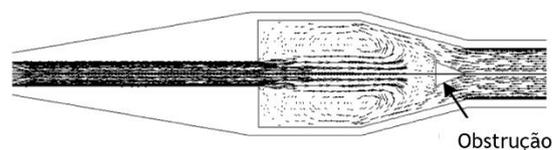


Figura 2.9- Vetor Velocidade no interior do pulsojato com obstrução em escoamento animado a 80 m/s (adaptado de [24]).

Capítulo 3

3 Fundamentos Teóricos

Por detrás do funcionamento de um pulsojato torna-se necessário assimilar um conjunto de conceitos e definições que são fundamentais à compreensão do desempenho de um motor pulsojato. O capítulo que se segue apresentará os conteúdos físicos e termodinâmicos relativos à operação deste tipo de propulsores, quais os procedimentos necessários para a sua inicialização, uma comparação relativamente a outros sistemas propulsivos e, ainda, serão mencionados alguns procedimentos capazes de melhorar o seu desempenho.

3.1 Pulsojato

O pulsojato é um motor a reação capaz de gerar tração intermitentemente podendo ser visto como um desenvolvimento intermédio entre os motores a pistão e turbinas de gás. A semelhança com os motores a pistão prende-se ao ciclo de combustão intermitente da mistura ar-combustível que, no caso das turbinas de gás, é contínua. Por outro lado, a semelhança com turbojatos consiste na exaustão de gases a elevadas temperaturas para gerar tração, ao invés do uso do hélice, bem como o trajeto linear da mistura desde a admissão até ao escape. Ao contrário de uma turbina de gás, um pulsojato é desprovido de qualquer compressor mecânico ou turbina [25].

Este tipo de propulsão caracteriza-se pela sua simples configuração que pode ser feita com um número insignificante de partes móveis ou até desprovido das mesmas. É constituído por uma admissão de ar, uma câmara de combustão e um ducto de escape ressoante acusticamente, ou seja, onde as ondas sonoras sofrem reflexão. O ar aspirado para o interior do pulsojato é feito de forma intermitente e, por consequência, ocorre uma combustão pulsante provocando que a tração gerada seja também ela intermitente. O pulsojato pode ser classificado em três tipos diferentes: com válvulas, sem válvulas e motor de detonação por pulso (*PDE*) [2].

3.2 Pulsojato com Válvulas

Este tipo de pulsojato apresenta um conjunto de válvulas unidirecionais, também designadas por válvulas de retenção, instaladas na admissão, através das quais o ar é aspirado para o interior da câmara de combustão. Pulsojatos de maiores dimensões adotam, normalmente, um sistema de grelha com válvulas de palhetas (Figura 3.1) que consistem em tiras finas em metal ou fibra de vidro que abrem e fecham quando ocorrem variações de pressão do lado oposto da válvula. Este sistema mecânico impede que, durante o processo de combustão, os produtos da

combustão sofram refluxo através da admissão, ou seja, apenas o fluxo no sentido da admissão para a câmara de combustão é permitido.

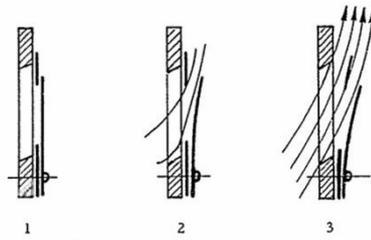


Figura 3.1- Passagem do escoamento pela abertura de uma válvula de palheta [26].

O combustível na forma de gás ou aerossol¹ é libertado no ducto de admissão ou injetado diretamente na câmara de combustão e, quando a mistura ar-combustível é inflamada, as válvulas fecham devido ao aumento da pressão interna da câmara. Desta forma, os gases quentes apenas são expulsos pela tubeira propulsiva, o que origina tração no sentido oposto de acordo com a terceira lei de Newton. Posteriormente, a pressão da câmara de combustão torna-se inferior à pressão atmosférica possibilitando a abertura das válvulas e, por sua vez, a admissão de uma nova descarga de ar que viabiliza a repetição do ciclo (ver Figura 3.2).

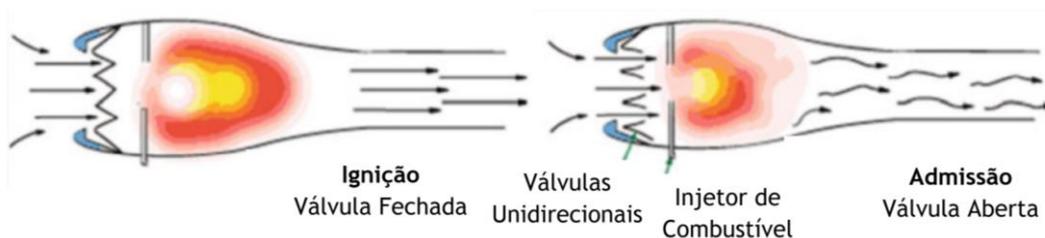


Figura 3.2- Operação do pulsojato com válvulas (adaptado de [2]).

Em pulsojatos de menores dimensões, capazes de produzir uma tração entre 1 e 5 kgf, são frequentemente usadas válvulas em forma de pétala [15]. Este sistema é constituído por um anel perfurado e por um disco em forma de pétala que cobre os mesmos orifícios (Figura 3.3).

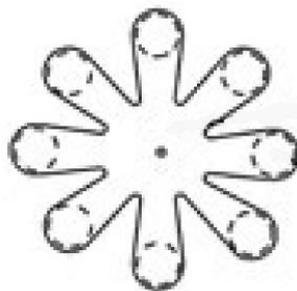


Figura 3.3- Válvula em forma de pétala (adaptado de [25]).

¹ Aerossol-Partículas líquidas suspensas num gás.

Vários têm sido os sistemas de válvulas desenvolvidos para controlar o fluxo de entrada para a câmara de combustão do pulsojato, no entanto, a fraca durabilidade das válvulas conduz a que grande parte desses estudos se concentrem em aumentar a vida útil das mesmas. A durabilidade dos sistemas de palhetas é prejudicada pela exposição a sucessivos ciclos de sobrepressão durante a explosão no interior da câmara de combustão. Esta deformação pode agravar-se em palhetas finas que se tornam tão convexas ao ponto de comprometerem a retenção dos gases quentes (Figura 3.4) [26].

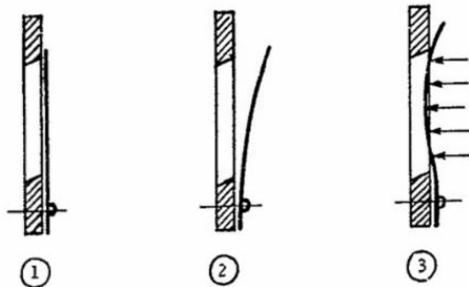


Figura 3.4- Válvula de palheta deformada [26].

O período de funcionamento das válvulas em pétala é comprometido pelas extremas temperaturas, pressões e elevada frequência. Devido ao disco em forma de pétala estar diretamente exposto aos produtos da combustão, isto faz com que sejam afetados por fendas ou fraturas que obrigam à substituição do disco de aço. No entanto, já existem estudos feitos no sentido de prolongar a durabilidade dos pulsojatos com válvulas, como por exemplo o estudo preliminar de um sistema de arrefecimento [15].

3.3 Pulsojato sem Válvulas

O incentivo para o desenvolvimento do motor pulsojato sem válvulas surge do desgaste típico das válvulas mecânicas dos pulsojatos valvulados, necessitando de substituição frequente, o que tem implicações no custo. A ausência de partes móveis faz do pulsojato sem válvulas um dos modelos de motor a reação mais simples, mas na verdade esta designação pode ser enganadora, uma vez que estes possuem válvulas aerodinâmicas que restringem o fluxo de gases num só sentido [2]. É a própria geometria do pulsojato que controla o escape dos produtos da combustão para fora do motor.

Existem diversos modelos de pulsojato sem válvulas, com diferentes formas e tamanho, mas todos eles são constituídos por uma câmara de combustão com ductos acoplados. Usualmente, o ducto de mais curto refere-se à admissão, enquanto o ducto mais longo refere-se ao escape. Quando se dá a ignição da mistura ar-combustível, os gases quentes são expulsos a alta velocidade não só pela tubeira propulsiva, como também pela admissão, o que em excesso pode ser prejudicial [25]. Esta revela-se uma das principais diferenças para com os motores

valvulados, em que o refluxo do escoamento é completamente evitado pelas válvulas mecânicas.

A exaustão dos produtos da combustão tanto pelo ducto de escape como pelo ducto de admissão, explica porque a maioria dos projetos de motores pulsojato sem válvulas apresenta ambos os ductos dispostos na mesma direção (Figura 3.5). Caso contrário, a tração realizada seria prejudicada, uma vez que as reações provenientes da admissão e do ducto propulsivo se cancelariam parcialmente [27].

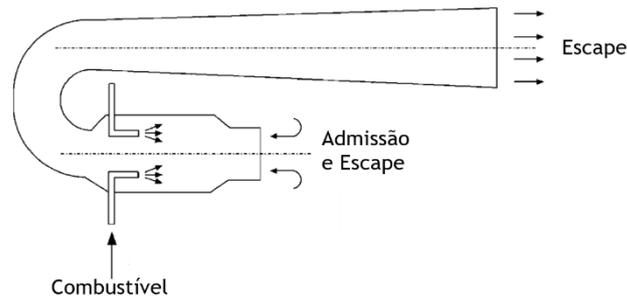


Figura 3.5- Pulsojato sem válvulas (adaptado de [27]).

Neste tipo de pulsojato, durante a combustão criam-se duas frentes de ondas, uma percorre a tubeira propulsiva (ducto superior, Figura 3.5), enquanto outra percorre a admissão (ducto inferior, Figura 3.5). A correta sincronização do sistema permite alcançar uma combustão estável e ressoante, o que favorece a tração. De acordo com Zheng et al. [22], a máxima tração é obtida quando a frequência da admissão e escape coincidem.

Em comparação com os motores valvulados, os pulsojatos sem válvulas apresentam geralmente maior dimensão física para a mesma tração e, por isso, maior resistência ao avanço, embora esta teoria não seja um requisito [2]. Por outro lado, os pulsojatos sem válvulas são habitualmente mais silenciosos, apesar de não serem tão eficientes, dado que a exaustão dos gases quentes pela admissão e escape, durante a expansão, origina uma menor pressão interna. Ao nível do fabrico, a simplicidade dos pulsojatos não valvulados distingue-se por não ser necessário perfurações nem recortes de chapas de aço, apenas tubos e cones soldados entre si.

3.3.1 Tipos de Pulsojatos sem Válvulas

O motor pulsojato sem válvulas pode ser construído em diversos tamanhos, desde alguns centímetros de comprimento a tamanhos de maiores dimensões. De notar que a dimensão do pulsojato influencia a escolha do combustível a usar de modo a garantir o efeito pulsante do motor, tal como será explicado na secção 3.9.1. De seguida, apresentam-se alguns dos modelos desenvolvidos.

O pulsojato Marconnet é uma das configurações de pulsojato sem válvulas mais antiga, desenvolvido há mais de 100 anos por Georges Marconnet (Figura 3.6). Esta geometria permite

que os produtos da combustão sejam expulsos tanto para trás como para a frente, pelo ducto de escape e pela admissão, respetivamente. Consequentemente, gera-se um desequilíbrio na tração.



Figura 3.6- Pulsojato Marconnet (adaptado de [28]).

O Escopette, Figura 3.7, é uma evolução do pulsojato de Marconnet corrigindo o problema da assimetria da produção de tração. Ao redirecionar em 180º a admissão, os gases de escape fluem no mesmo sentido, o que contribui para o aumento da tração total. Além disso, o espaço entre o tubo em forma de “U” e o ducto da admissão, permite aspirar ar necessário ao ciclo seguinte.

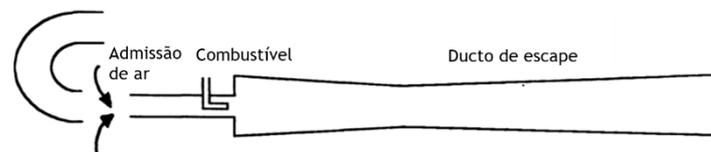


Figura 3.7- Pulsojato sem válvulas Escopette (adaptado de [28]).

O modelo Lockwood-Hiller distingue-se pela forma em “U” e pela possibilidade de acoplar aumentadores de tração na entrada e na saída (Figura 3.8). Estes dispositivos permitem aumentar a tração do pulsojato através da expansão do ar admitido, tal como será esclarecido na secção 3.11.

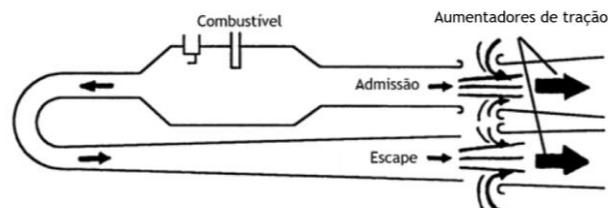


Figura 3.8- Pulsojato Lockwood-Hiller, com aumentadores de tração (adaptado de [28]).

O pulsojato Chinês apresenta uma configuração simples, constituído por um longo ducto de exaustão e uma admissão curta, ambos voltados para jusante (Figura 3.9).

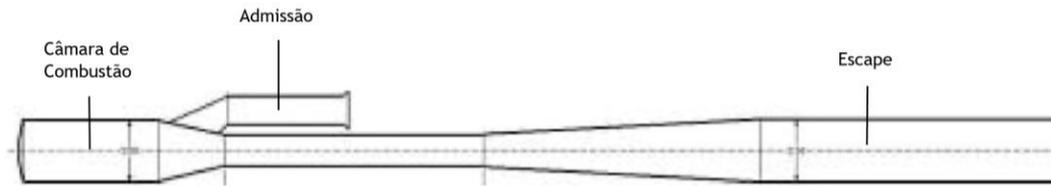


Figura 3.9- Pulsojato Chinês (adaptado de [6]).

Bastante semelhante à configuração anterior, o Thermojet pode conter de duas até quatro entradas paralelas à tubeira propulsiva (Figura 3.10).

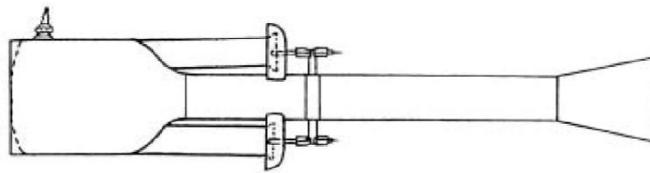


Figura 3.10- Thermojet [6].

Kentifield [29] desenvolveu, numa universidade do Canadá, um modelo de pulsojato sem válvulas que, segundo o próprio, é capaz de produzir mais potência por unidade de comprimento em relação às configurações convencionais, para além de um melhor consumo específico de combustível (Figura 3.11).

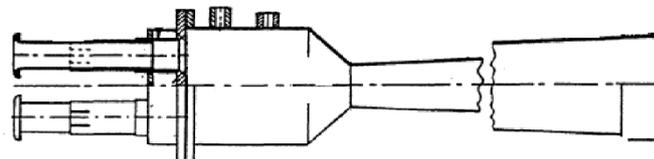


Figura 3.11- Pulsojato sem válvulas desenvolvido por Kentifield [30].

3.4 Motor de Detonação por Pulso

O motor de detonação pulsante, também designado por *PDE* na nomenclatura inglesa, é uma abordagem relativamente recente dos motores a jato de combustão intermitente. Este destaca-se pela massa reduzida, fácil fabrico e consumo de combustível mais eficiente, até mesmo quando comparado com os motores *turbofan*. Apesar de, até à data, nenhum modelo de detonação por pulso ter sido posto em produção, empresas como a Pratt & Whitney e a General Electric, para além de investigações levadas a cabo pela NASA, têm realizados testes no sentido de que esta tecnologia venha a ser implementada no futuro.

Os motores a jato que operam atualmente, funcionam num regime de deflagração do combustível, ou seja, dá-se uma combustão rápida, mas que não se atinge a velocidade do som.

Em oposição, o novo conceito de motor de detonação por pulso opera em detonação do combustível, isto é, em combustão supersônica. Assim, a principal diferença para com os pulsojatos valvulados e não valvulados é que, enquanto o *PDE* detona o combustível, os pulsojatos deflagram.

O motor de detonação por pulso detona o combustível de forma a produzir uma pressão extremamente elevada que, por sua vez, é convertida num maior ganho de tração. Este sistema propulsivo tem a vantagem, sobre os pulsojatos com e sem válvulas, da combustão assemelhar-se perfeitamente com a combustão a volume constante, em vez da aproximação a volume constante característica dos pulsojatos. Tal facto, faz dos *PDE*'s motores termodinamicamente mais eficientes. No entanto, já existem estudos que põem em causa a veracidade desta teoria afirmando que a detonação pode originar uma alteração das propriedades do estado termodinâmico [31].

O elevado impulso específico, bem como a elevada eficiência que define os motores de detonação por pulso, faz destes uma opção para o transporte civil de alta velocidade, propulsão espacial, transporte aéreo militar, mísseis de longo alcance, entre outras.

O *PDE* pode ser aplicado de forma independente, numa combinação de ciclos ou num sistema híbrido [27]. O primeiro, consiste num conjunto de ductos de detonação, uma admissão e um bocal. No entanto, o elevado ruído, para além da queda de eficiência para números de *Mach* elevados, limitam a aplicação em grande escala. O segundo, sugere a introdução de um *PDE* ao fluxo de um *ramjet* ou *scramjet* a fim de aumentar a eficiência em velocidades mais elevadas, até *Mach* 5,5. Por último, o sistema híbrido pode surgir de duas formas distintas, uma em que o *PDE* substitui a câmara de combustão convencional, o que pode danificar as pás da turbina pelas temperaturas elevadas fornecidas, e outra em que o *bypass* de um *turbofan* (Figura 3.12) seria acelerado por um conjunto de *PDE*'s.

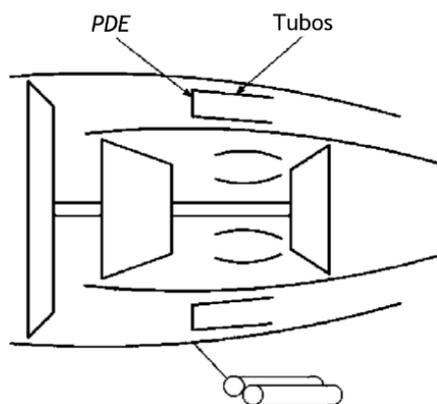


Figura 3.12- Turbofan-PDE híbrido (adaptado de [27]).

3.5 Ciclo Operacional

Para melhor compreensão do modo de funcionamento de um pulsojato, apresenta-se, na Figura 3.13, o ciclo operacional de um pulsojato sem válvulas com aumentadores de tração instalados.

Numa fase inicial (1), a combustão no interior do pulsojato inicia-se com a inflamação da mistura estequiométrica² de ar e combustível, provocando a libertação de gases como, por exemplo, dióxido de carbono, monóxido de carbono e vapor de água. Desta forma, estes gases ocupam grande parte do espaço interior, favorecendo o aumento da pressão e da temperatura na câmara de combustão. A pressão na câmara atinge o valor máximo durante a combustão.

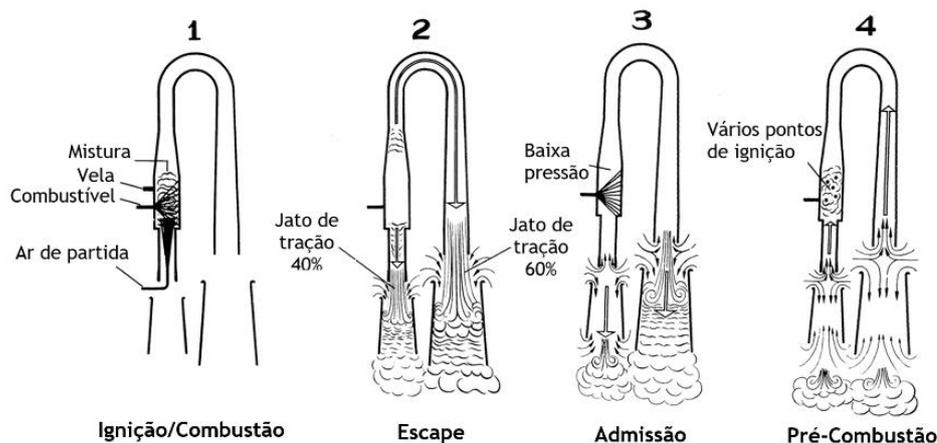


Figura 3.13- Ciclo operacional de um pulsojato (adaptado de [32]).

No segundo processo, designado por escape, o aumento de pressão criado na câmara de combustão na fase anterior, provoca que a injeção de combustível cesse momentaneamente, bem como obriga à exaustão dos gases de escape tanto pela saída como pela entrada. Assim, como para cada ação existe uma reação, pela terceira Lei de Newton, os gases quentes libertos contribuem para a tração total do pulsojato. Uma vez que a linha da admissão é mais curta relativamente ao comprimento da tubeira de escape, os gases expulsos pela entrada demoram um menor tempo a serem evacuados em relação aos expulsos pelo ducto de escape. Assim, sob a mesma pressão existente na câmara, a admissão varre completamente todos os produtos da combustão, enquanto no ducto de escape permanecem gases residuais à medida que a fase da admissão se inicia.

Após a libertação dos gases de escape, a pressão interna da câmara de combustão atinge o seu valor mínimo propiciando um vácuo parcial e, uma vez que o escoamento se desloca das zonas de alta pressão para as de baixa pressão, o diferencial entre a pressão atmosférica no exterior com o interior da câmara, provoca que seja aspirado ar por ambas as extremidades. Além disso,

² Mistura estequiométrica- Mistura que contém a proporção de ar necessária para queimar todo o combustível presente.

potencia a formação de uma zona rica pela injeção de combustível. Desta forma, pelo efeito de Kadenacy, o motor pulsojato consegue admitir ar, através da expansão dos gases de escape. O retorno do fluxo de volta para a câmara de combustão, tanto da entrada como da saída, provoca a colisão de ambos os escoamentos o que leva, novamente, a que pressão aumente. Devido a este incremento na pressão, a fase da admissão (3) é também designada por compressão.

Por último, no período de pré-combustão (4), já não é necessária qualquer fonte de ignição externa para inflamar a mistura ar-combustível. Por sua vez, a ignição deve-se aos gases quentes residuais que permanecem no interior da tubeira de escape, durante a exaustão dos produtos da combustão. Estes são sugados para o interior da câmara, juntamente com a nova carga de ar e combustível, atuando como múltiplos pontos de ignição da mistura. Uma vez que a ignição ocorre em diversos pontos de forma quase simultânea, permite que o tempo de combustão seja bastante reduzido em relação à ignição de ponto único. Por outras palavras, a ignição multiponto aproxima o tempo da combustão para um processo a volume constante, ou seja, impedir que a carga expanda até que seja totalmente consumida. Além disso, o recuo da coluna de gases quentes do ducto de escape, a grande velocidade, é responsável por comprimir a nova mistura na câmara de combustão, ou seja, atua da mesma maneira como um pistão mecânico num motor alternativo. Assim, após a ignição por convecção, a pressão interna sobe novamente e todo o ciclo se repete, permitindo o efeito intermitente do pulsojato.

3.6 Ciclo Termodinâmico

Os ciclos termodinâmicos são a base de operação dos motores a combustão, sendo os motores alternativos descritos geralmente pelos ciclos Otto ou Diesel, enquanto as turbinas de gás obedecem ao ciclo de Brayton. Todos eles admitem ar, comprimem-no, misturam e queimam ar com combustível e expulsam os produtos da combustão enquanto produzem trabalho. A Figura 3.14 representa o diagrama do ciclo termodinâmico Otto e Diesel.

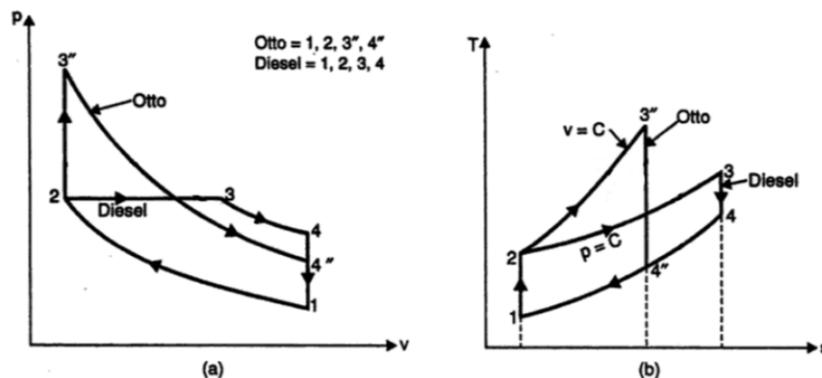


Figura 3.14- Comparação entre ciclo Otto e Diesel ideal (adaptado de [35]).

Embora existam variações nos diagramas que representam cada um destes três ciclos, todos têm em comum quatro processos: $4 \rightarrow 1$ representa a admissão, $1 \rightarrow 2$ a compressão, $2 \rightarrow 3$ combustão e $3 \rightarrow 4$ a expansão.

O ciclo termodinâmico que descreve a operação de um pulsojato é, na verdade, uma combinação do ciclo Otto e Diesel. Tal como o ciclo Otto, no pulsojato, a fase de expansão é isentrópica³. À semelhança do ciclo *Diesel*, num pulsojato a ignição da mistura ar-combustível sucede pelo aumento da pressão e temperatura de gases residuais que permanecem na câmara, sendo que para o início do funcionamento do motor a reação torna-se necessário uma fonte de ignição externa.

Assim, a operação de um motor pulsojato pode ser explicada pela combinação de dois ciclos diferentes: Ciclo de Lenoir e o Ciclo de Humphrey [33]. No primeiro ocorre a adição de calor a volume constante e uma expansão isentrópica e adiabática⁴. O ciclo de Humphrey opera de forma semelhante, no entanto adiciona ao ciclo uma compressão isentrópica.

3.6.1 Ciclo de Lenoir

Os diagramas Pressão-Volume e Temperatura-Entropia do ciclo ideal de Lenoir encontram-se representados na Figura 3.15, sendo que: $1 \rightarrow 2$ corresponde à combustão isocórica⁵, $2 \rightarrow 3$ representa a expansão isentrópica sem trocas de calor com o exterior e $3 \rightarrow 1$ a rejeição de calor isobárica⁶.

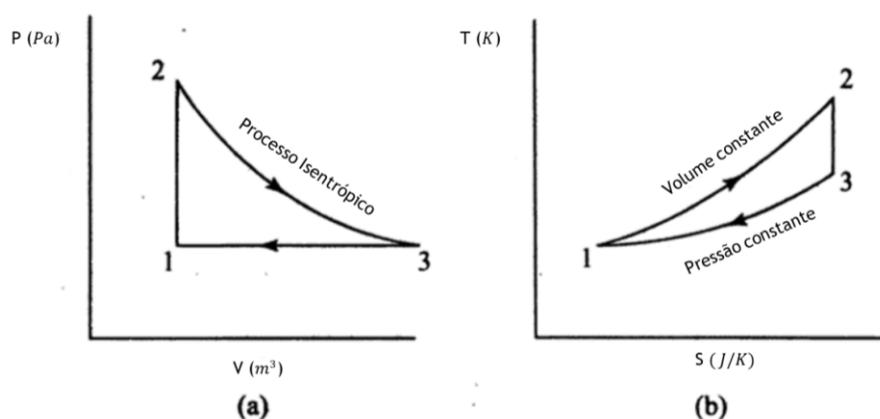


Figura 3.15- Ciclo ideal de Lenoir (adaptado de [34]).

Apesar de na Figura 3.15 apenas estarem representados três processos termodinâmicos, são quatro os fenômenos físicos que descrevem o ciclo de Lenoir, no entanto, uma vez que a

³ Isentrópico- Processo termodinâmico com variação de entropia nula.

⁴ Adiabático- Reação termodinâmica sem trocas de calor com o ambiente.

⁵ Isocórico- Processo termodinâmico a volume constante.

⁶ Isobárico- Processo termodinâmico a pressão constante.

admissão e a compressão ocorrem simultaneamente, apenas é exposta uma única linha, 3→1, que demonstra estes fenómenos simultaneamente.

Durante a admissão/compressão, representada pela linha 3→1, a câmara de combustão é alimentada por uma carga de ar que comprime os gases residuais que permaneceram do ciclo anterior, ao mesmo tempo que ocorre uma nova descarga de combustível. Desta forma, existe uma diminuição volumétrica da mistura. De seguida, ocorre a ignição da mistura ar-combustível pelos gases quentes retidos, permitindo a combustão no interior da câmara sob um processo a volume constante. Esta hipótese isocórica surge da constatação de que muito poucos produtos abandonam a câmara durante a combustão. Neste ponto, 1→2, a pressão, temperatura e a entropia aumenta significativamente. Por último, no processo 2→3, sucede a expansão isentrópica e o escape dos produtos da combustão tanto pelo ducto de admissão como pela tubeira propulsiva provocando, desta forma, uma diminuição da pressão interna que favorece o reinício do ciclo com uma nova carga de ar e combustível.

3.6.2 Ciclo de Humphrey

Na Figura 3.16 apresenta-se o ciclo ideal de Humphrey que descreve, segundo El-Sayed [2], o comportamento termodinâmico de um pulsojato. Neste ciclo é relatado a existência de uma pequena compressão que antecede a combustão, sendo constituído por quatro processos: a→2 representa uma compressão isentrópica, 2→3 a combustão isocórica, 3→4 a expansão isentrópica dos gases e, por último, 4→a retrata a rejeição de calor isobárica.

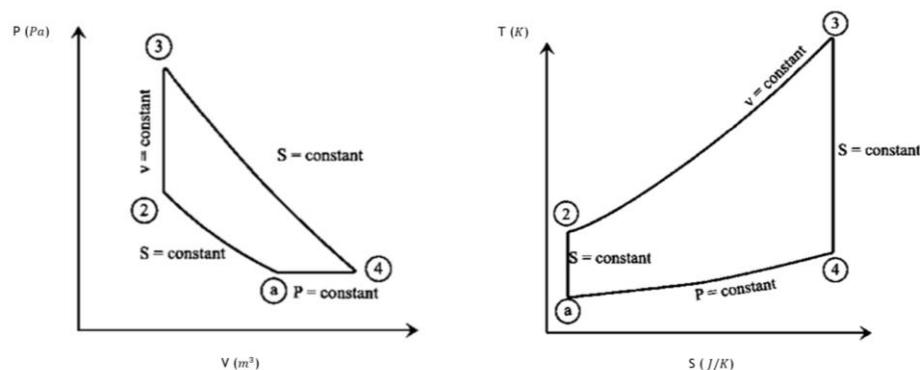


Figura 3.16- Ciclo ideal de Humphrey (adaptado de [2]).

De seguida são explicados os fenómenos termodinâmicos que ocorrem no interior do pulsojato, bem como o cálculo de parâmetros necessários para determinar o seu desempenho.

- Ducto de Admissão

No interior do ducto de admissão ocorre o processo a→2 onde ar é aspirado para o interior da câmara de combustão. O estado (a) corresponde a um ponto colocado suficientemente distante da admissão, em escoamento não perturbado, enquanto o estado (1) localiza-se à entrada no

lado exterior e o estado (2) do mesmo modo, mas no lado interior. Devido ao *ram effect*⁷, a pressão e a temperatura aumentam a partir das condições ambiente até às condições do estado (1):

$$P_{01} = P_{0a} = P_a \left(1 + \frac{\gamma_c - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}} \quad (3.1)$$

A temperatura de estagnação dos estados (a) e (1) é calculada através de:

$$T_{01} = T_{0a} = T_a \left(1 + \frac{\gamma_c - 1}{2} M^2\right) \quad (3.2)$$

Devido às perdas provocadas pela própria geometria da admissão, a pressão em (2) difere da pressão em (1), apesar de ambas as temperaturas de estagnação serem iguais ($T_{01} = T_{02}$). Assim, a pressão de estagnação em (2) determina-se por:

$$P_{02} = P_a \left(1 + \eta_d \frac{\gamma_c - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}} \quad (3.3)$$

• Câmara de Combustão

Uma vez injetado o combustível na câmara, o motor inicia o fenómeno da combustão, que pode ser aproximado a um processo a volume constante. No momento em que a mistura ar-combustível é inflamada, dá-se uma explosão no interior da câmara que conduz ao aumento da pressão e temperatura. Para esta adição de calor isocórica sucede a pressão máxima:

$$P_{03} = P_{02} \left(\frac{T_{03}}{T_{02}}\right) \quad (3.4)$$

A temperatura máxima no pulsojato, que acontece no estado (3), é determinada pelo balanço energético na câmara de combustão, equação 3.5.

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_f)c_{p_h}T_{03} = \dot{m}_a c_{p_c}T_{02} + \eta_b \dot{m}_f Q_R \quad (3.5)$$

Da mesma relação, obtém-se a razão combustível-ar, equação 3.6.

$$r_{c/a} = \frac{c_{p_h}T_{03} - c_{p_a}T_{02}}{\eta_b Q_R - c_{p_h}T_{03}} \quad (3.6)$$

• Tubeira Propulsiva

Em resultado das elevadas condições de pressão e temperatura, os produtos da combustão são expulsos a grande velocidade para o exterior. Considerando a expansão isentrópica dos gases

⁷ *Ram effect*- Quando uma aeronave voa a alta velocidade, o ar admitido é comprimido sem o trabalho de qualquer compressor mecânico.

até à pressão atmosférica, visto que o escoamento não atinge a velocidade do som, sucede que $P_4 = P_a$. A temperatura dos gases de escape obtém-se através de:

$$\left(\frac{T_{03}}{T_4}\right) = \left(\frac{P_{03}}{P_a}\right)^{\frac{\gamma_h-1}{\gamma_h}} \quad (3.7)$$

O módulo da velocidade de escape e da tração geradas pelo pulsojato, são calculadas através das equações 3.8 e 3.9, respetivamente [2].

$$|\vec{U}_e| = \sqrt{2C_{p_h}T_{03} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_{03}}\right)^{\frac{\gamma_h-1}{\gamma_h}} \right]} \quad (3.8)$$

$$|\vec{F}| = \frac{\dot{m}_a}{1000} [(1 + r_{c/a})U_e - U] \quad (3.9)$$

O consumo específico de combustível (*TSFC*) é dado pela relação seguinte [2]:

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F} \times 3,6 = \frac{r_{c/a}}{\dot{m}_a} \times 3,6 \quad (3.10)$$

3.7 Tração Estática Máxima

Um dos principais parâmetros de desempenho a ter em conta num motor a reação, é a força de tração capaz de impulsionar a aeronave para a frente. Segundo a terceira lei de Newton, esta força vetorial, com módulo, direção e sentido, provém da reação de acelerar uma determinada massa de ar para trás, isto é, a força de tração é gerada na direção oposta à aceleração dos gases, pela energia proveniente da combustão.

Na secção anterior, descreveu-se uma forma teórica de calcular a tração desenvolvida em voo por um pulsojato, no entanto, a equação 3.9, exige que a velocidade de escape e as proporções de ar e combustível sejam conhecidas o que, por vezes, do ponto de vista prático, são parâmetros difíceis de obter.

Alternativamente, em virtude dos estudos realizados por Tharratt [38], é possível prever a magnitude máxima da tração estática de um pulsojato, somente com base em dados geométricos. Assim, sem ter qualquer tipo de conhecimento sobre termodinâmica e comportamento dinâmico dos gases no interior do propulsor, consegue-se estimar o módulo da tração, através da razão entre volume e comprimento do motor, descritos na equação 3.11.

$$\frac{V}{L} = 6,6e^{-5} |\vec{F}| \quad (3.11)$$

Apesar de Tharratt ter descrito a equação anterior para ductos propulsivos valvulados mecanicamente, esta é a única alternativa para calcular a intensidade da tração de pulsojatos sem válvulas, uma vez que não se encontram estudos para tal.

3.8 Frequência de Operação

Como habitualmente acontece nos motores a pistão e a reação, o número de revoluções por minuto é tipicamente utilizado para caracterizar a rapidez com que o motor opera e, no caso do pulsojato, não é exceção. A frequência de ciclos praticados por segundo é, usualmente, um parâmetro utilizado para descrever o comportamento do pulsojato. Devido à enorme diversidade de pulsojatos com geometrias diferentes, não existe um consenso sólido entre autores relativamente à teoria capaz de prever a frequência operacional de um motor de deflagração por pulsos. No entanto, uma constatação é unânime, a frequência do pulsojato, valvulado ou não, é inversamente proporcional ao seu comprimento total, isto é, $f \propto \frac{1}{L}$.

No que diz respeito a motores valvulados mecanicamente, autores como Greatrix [25] e Tharratt [38] defendem que a determinação da frequência pode ser explicada pela terminologia acústica de 1/4 de onda. Segundo esta teoria, o funcionamento do pulsojato valvulado deve-se a um sistema de quatro ondas de pressão: compressão-rarefação-rarefação-compressão. Atendendo que estas se deslocam, aproximadamente, à velocidade do som e que, para cada ciclo, o comprimento de onda é $4L$, a frequência é calculada através da equação 3.12.

$$f = \frac{1}{\Delta t_{ciclo}} \approx \frac{1}{\frac{\lambda}{c}} \approx \frac{c}{4L} \quad (3.12)$$

Quanto a pulsojatos sem válvulas, as investigações realizadas por Zheng et al. [22] e Ordon [37] sugerem o cálculo da frequência tratando a admissão como um ressoador de Helmholtz⁸, e o ducto de escape modelado com a teoria acústica de 1/6 de onda. Assim, a frequência da admissão, obtém-se através da equação seguinte.

$$f_a = \frac{c_a}{2\pi} \sqrt{\frac{S_a}{V_{cc}L_a}} \quad (3.13)$$

Por sua vez, a teoria acústica de um sexto de onda define a frequência da conduta de escape, através da equação 3.14.

$$f_e = \frac{c_e}{6L_e} \quad (3.14)$$

⁸ Ressorador de Helmholtz-Reservatório de gás contendo um orifício ou gargalo aberto, cujo ar interior próximo da abertura vibra, devido à “elasticidade” do ar [38].

Finalmente, a frequência de operação do pulsojato sem válvulas, é dada pela média entre as frequências calculadas anteriormente, equação 3.15.

$$f = \frac{f_a + f_e}{2} \quad (3.15)$$

3.9 Como iniciar um Pulsojato

Sendo o motor pulsojato um motor de combustão interna, são necessários três elementos que devem ser fornecidos na proporção e momento certos para iniciar a sua operação:

- Combustível
- Ar comprimido
- Fonte de ignição

Na prática, aconselha-se primeiro ligar a ignição, de seguida injetar combustível e, por último, fornecer ar comprimido para o interior do propulsor.

3.9.1 Combustível

O motor a reação por pulsos tem a vantagem de conseguir operar com os mais variados tipos de combustível sem grandes penalizações no desempenho. O seu funcionamento consegue-se não só com combustíveis líquidos e gasosos (GPL), mas também combustíveis sólidos, como carvão, já foram reportados [30]. A escolha do combustível pode ser influenciada por diversos fatores, desde o preço, facilidade em inicializar a frio, à dimensão e ao tipo de pulsojato. Para um sistema mecanicamente valvulado, o tipo de combustível influencia a vida útil das válvulas.

Para pulsojatos de menores dimensões, são utilizados normalmente propelentes líquidos como gasolina, metanol (CH_3OH), nitrometano (CH_3NO_2) ou hidrogénio (H_2). A gasolina demonstra ser uma boa opção, uma vez que possui um índice de inflamabilidade estrito, ou seja, a chama extinguir-se-á facilmente caso a mistura seja demasiado rica ou pobre, o que beneficia a combustão intermitente. O metanol e o nitrometano são atrativos pelo elevado poder calorífico que os caracteriza, embora existam algumas limitações na sua utilização. O índice de inflamabilidade elevado e chama invisível durante a queima de metanol, tornam perigosa a sua manipulação e, por outro lado, o nitrometano apresenta um custo elevado quando aplicado em larga escala. O hidrogénio, devido ao elevado poder calorífico, tem uma combustão exageradamente rápida, o que permite reduzir o tempo de residência no interior da câmara, direcionando-se a sua aplicação a pulsojatos de escala extremamente reduzida. Por este motivo foi utilizado hidrogénio no pulsojato de apenas 8 cm testado por Geng et al. [20].

Uma alternativa capaz de atenuar o custo de operação é o diesel ou querosene. Apesar de se tornar rentável a sua utilização em pulsojatos de maiores dimensões, estes dificultam a inicialização do ciclo termodinâmico em ambiente frio. Em alternativa, opta-se

frequentemente por inicializar o ciclo com um combustível mais inflamável (propano, por exemplo) de forma a elevar a temperatura interna permutando-se, posteriormente, para o sistema de diesel ou querosene.

Para além de combustíveis líquidos, também gases voláteis podem alimentar o processo da combustão, tal como butano (C_4H_{10}), metano (CH_4) e propano (C_3H_8). A grande vantagem em recorrer a combustíveis gasosos face aos líquidos é a ausência de uma bomba de combustível. Ao invés disso, o gás é introduzido sob pressão no reservatório permitindo que este funcione, simultaneamente, como uma bomba de pressurização. Além disso, o facto destes gases terem o ponto de ebulição bastante abaixo da temperatura ambiente, elimina a necessidade de serem vaporizados, ao contrário do que acontece com combustíveis líquidos. O caudal de gás injetado diretamente na câmara de combustão pode ser controlado por um regulador instalado no bocal de saída do depósito.

3.9.2 Ar Comprimido

Como qualquer reação de combustão, é necessário fornecer um comburente capaz de reagir com o combustível, a fim de se dar a libertação espontânea de calor. Assim sendo, é fundamental forçar a entrada de ar pela admissão proporcionando uma mistura explosiva no interior do motor de deflagração. Após a libertação de combustível na câmara fornece-se um suplemento de ar comprimido, ou seja, ar acima da pressão atmosférica, que provém, por exemplo, de um simples compressor doméstico. Caso a fonte de ar comprimido fosse removida, ou a pressão do ar insuficiente, o motor queimaria segundo uma mistura excessivamente rica e, muito provavelmente, apenas uma forte chama seria expulsa pela tubeira propulsiva, sem que o efeito pulsante surgisse. De salientar que esta adição de ar apenas é necessária para iniciar o motor a reação. Uma vez alcançado o efeito pulsante autossustentável, a fonte de ar comprimido é dispensada.

3.9.3 Fonte de Ignição

Tal como o fornecimento de ar comprimido, a fonte de ignição da mistura ar-combustível apenas é necessária inicialmente, podendo ser desconectada assim que o funcionamento estável seja atingido. Existem diversas formas de inflamar a mistura no interior do pulsojato. Um dos métodos mais simples, mas menos eficaz, consiste em posicionar na extremidade do ducto propulsivo uma chama exposta, como por exemplo, um maçarico a gás. O sistema de ignição mais comumente utilizado em pulsojatos, é uma vela de ignição instalada na parede da câmara de combustão. Para despontar a descarga elétrica na vela, pode ser construído um circuito elétrico impresso (PCB) ou instalado um conjunto de peças usado na indústria automóvel. Este conjunto inclui uma bateria, uma bobine, um condensador, um conjunto de contactos platinados e, claro, a vela de ignição. Outra alternativa, também ela simples, consiste em inflamar a mistura com uma célula piezoelétrica em que é necessário pressionar um botão repetidamente até que o motor acione.

Após alcançado um ciclo termodinamicamente estável, a ignição da mistura no interior da câmara é assegurada pelos gases quentes residuais que permanecem durante a exaustão. Este facto potencia o aumento da vida útil das velas de ignição em comparação com as utilizadas no meio automóvel, pois apresentam um curto período de funcionamento.

3.10 Pulsojato Relativamente a Outros Sistemas Propulsivos

Entre os mais variados sistemas de propulsão existentes, o motor pulsojato distingue-se pela simplicidade de construção, por incluir um número reduzido de partes móveis internas ou, até, isento das mesmas, no caso de um motor sem válvulas. Tal facto, contribui para maior facilidade na sua manutenção, bem como menor dano estrutural no caso de, por exemplo, colisão com aves durante o voo. Devido à deflagração característica da combustão do pulsojato, estes motores são extremamente eficientes relativamente à emissão de gases poluentes para a atmosfera, mesmo quando alimentados com combustíveis que usam hidrocarbonetos [2]. Além disso, como mencionado na secção anterior, o efeito pulsante do pulsojato pode ser alimentado por uma grande diversidade de combustíveis, em contraste com a maioria dos sistemas propulsivos, cujo funcionamento se restringe a um propelente específico.

Algumas limitações relativamente à operação dos pulsojatos comprometem a sua aplicação na indústria aeronáutica. Exemplo disso, são o elevado ruído produzido, bem como as vibrações intensas resultantes do efeito pulsante. Além do mais, o motor de deflagração por pulsos apresenta um consumo específico de combustível (TSFC) elevado, quando comparado com outros sistemas propulsivos. Em relação a um motor *turbofan* ou um motor a pistão, o pulsojato apresenta uma baixa eficiência termodinâmica, desperdiçando grande parte da energia proveniente da queima de combustível como calor para as paredes das condutas, minimizando a quantidade de energia capaz de produzir tração. Por este motivo, durante o funcionamento do motor pulsante, as paredes atingem o estado de incandescência, devido às elevadas temperaturas.

Para além do elevado consumo de combustível se dever à dissipação de energia como calor, também a reduzida compressão mecânica da mistura ar-combustível, antes da ignição, afeta o aproveitamento energético da combustão. O motor pulsojato é desprovido de qualquer pistão ou compressor rotativo, daí que apresente taxas de compressão bastante aquém das praticadas por um motor alternativo convencional ou por um *turbofan*. A compressão da mistura, num motor pulsante, deve-se ao deslocamento da coluna de gases quentes da tubeira de escape, a qual apresenta fraca capacidade de redução do volume útil e, desta forma, a eficiência da combustão sai prejudicada.

Ainda no caso particular de pulsojatos valvulados mecanicamente, estes estão suscetíveis ao dano das válvulas que os constituem. Devido às elevadas temperaturas e à exposição à fadiga, leva a que estas sejam frequentemente reparadas ou, até, substituídas.

3.11 Melhorar o Desempenho de um Pulsojato

Apesar das limitações que caracterizam o desempenho de um motor pulsojato, este pode ser corrigido e melhorado com algumas modificações. Como relatado anteriormente, um dos maiores problemas que afeta este tipo de motores, é o exagerado consumo de combustível relativamente a outros sistemas propulsivos, isto para a condição de igual tração. Para além de grande parte deste problema se dever à baixa razão de compressão da mistura, existem outros fatores responsáveis pela reduzida eficiência da combustão. De seguida, são apresentadas algumas alternativas que visam beneficiar a operação de um motor pulsante.

No caso de pulsojatos cuja alimentação de combustível é feita através de injeção direta na câmara, existe um desperdício significativo de propelente. A libertação contínua de combustível durante todo o ciclo operacional do motor, provoca que parte do mesmo seja expulso pela tubeira de escape, sem que sofra o processo de combustão. Para contornar esta limitação, Simpson [30] sugere a colocação de uma válvula tipo palheta na extremidade do tubo responsável pela injeção de combustível (Figura 3.17). Deste modo, este simples mecanismo tira partido do facto do maior desperdício ocorrer no período em que a pressão interna é mais elevada para, assim, a força exercida sobre a palheta bloquear o orifício de combustível. Posteriormente, a baixa pressão sentida na câmara, durante a fase da admissão, provoca a desobstrução do injetor e, conseqüentemente, o fluxo de combustível é retomado.



Figura 3.17- Mecanismo de injeção intermitente de combustível [30].

Para além da constatação de que existe combustível que não participa na combustão, o mesmo se passa com o fluxo mássico de ar, no interior do pulsojato. As simulações numéricas realizadas por Zheng et al. [24], revelam que introduzir uma obstrução no interior da câmara de combustão, aumenta a vorticidade do escoamento e obriga a que grande parte do ar aspirado participe no processo de combustão, Figura 2.9. Daqui resulta uma combustão mais eficiente e, conseqüentemente, maior tração produzida.

Outra técnica que promove significativamente o desempenho de um motor pulsante, passa por fazer uso de uma onda de detonação para inflamar a mistura, conhecido como motor de detonação por pulsos (*PDE*). Tal como referido previamente, este é um conceito relativamente

recente que ainda está em fases de testes, responsável por provocar o aumento da pressão interna pela detonação do combustível, ou seja, a velocidade de combustão da mistura é aumentada para velocidades que superam a velocidade do som.

O déficit de tração gerado por este tipo de motores pode ser otimizado, através da instalação de aumentadores de tração nas extremidades do pulsojato (ver Figura 3.8). Num tom de comparação, pode-se afirmar que os aumentadores de tração estão para o pulsojato, tal como o *afterburner* está para um turbojato. Uma vez que a força de tração gerada resulta do produto da quantidade de massa pela aceleração a ela transmitida, os aumentadores permitem maior tração pelo aumento do fluxo de massa expelido pela adição de ar. Segundo o efeito de Bernoulli, escoamentos animados com velocidades elevadas, correspondem a menores pressões e, por consequência, o ar quente expulso a grande velocidade pelo ducto de escape encontra-se a uma pressão inferior à pressão atmosférica. Assim, uma vez que o escoamento é transferido das zonas de alta pressão para as de menor pressão, o ar frio exterior é admitido, através da abertura entre o difusor e a tubeira propulsiva e, posteriormente, é aquecido. Isto permite que o ar aspirado sofra expansão, de forma que a velocidade a que o fluxo é expulso não é prejudicada. No entanto, a utilização destes dispositivos num motor pulsante é apenas atraente a baixas velocidades de voo, pois, a velocidades elevadas, a resistência ao avanço produzido pela geometria do difusor, deixa de compensar o ganho de tração conseguido com o mesmo. A Figura 3.18 reproduz o efeito de aumento de tração.

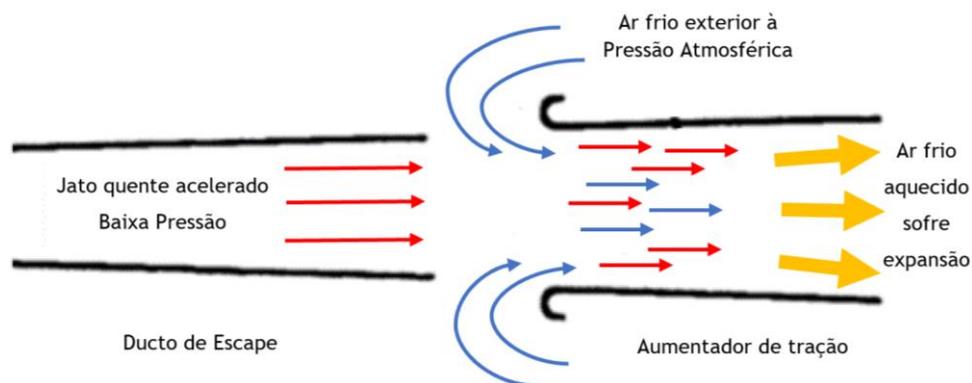


Figura 3.18- Princípio de funcionamento de um aumentador de tração.

Capítulo 4

4 Instalação Experimental

No presente capítulo será especificado todo procedimento experimental, desde a construção do pulsojato e respetivo banco de ensaios, descrição dos três sistemas complementares fundamentais à operação do propulsor, bem como a configuração final do motor, após terem existido limitações que comprometeram o seu funcionamento.

4.1 Configuração Inicial do Pulsojato

O propulsor alvo de estudo desta investigação, teve por base um modelo numérico de um pulsojato não valvulado do tipo *chinese*, previamente desenvolvido e testado por uma aluna do Departamento de Ciências Aeroespaciais da UBI [36]. Devido à dificuldade em encontrar uma teoria de dimensionamento para pulsojatos não valvulados, o modelo numérico formulado foi fundamentado numa rotina de cálculo com base em propulsores já existentes, em conjugação com algumas equações descritas na literatura. Assim sendo, o pulsojato inicialmente proposto teve por base a configuração da Figura 4.1.

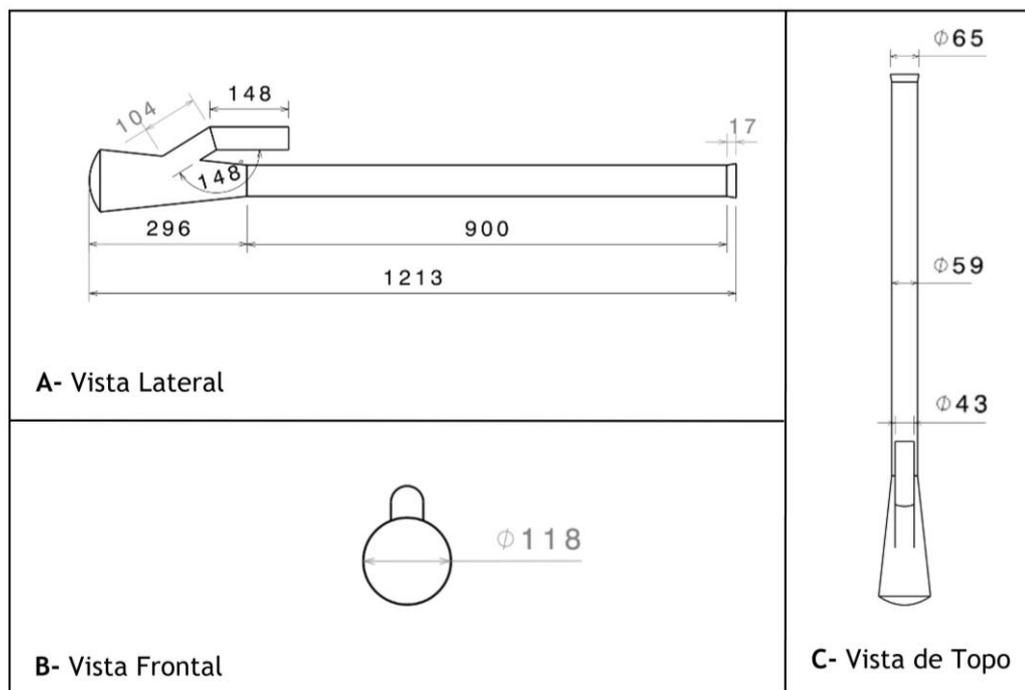


Figura 4.1- Dimensões iniciais do pulsojato, em mm.

De salientar que algumas das medidas acima apresentadas sofreram um pequeno desvio relativamente aos critérios de projeto, devido a limitações na capacidade de construção, bem

como restrições ao nível do mercado, tal como será especificado na secção seguinte. Além disso, numa primeira fase, não foi instalado o divergente na tubeira de escape.

4.2 Construção do Pulsojato

De modo a não comprometer a operação do pulsojato durante os testes, foi necessário ter em conta alguns compromissos quanto à seleção dos materiais. O facto do pulsojato ser um motor a reação que opera com temperaturas que facilmente superam os 1000 °C, exigiu que fossem utilizados aços de espessura não inferior a 1 mm, para os principais componentes do pulsojato. Deste modo, evitou-se a existência de distorções nas paredes do propulsor, devido à minimização do efeito das tensões térmicas.

4.2.1 Admissão

Uma vez que a admissão contém um cotovelo de 148°, obrigou a que esta fosse fabricada a partir de duas peças distintas. Para tal, foram recortados dois planos em aço galvanizado de 1,5 mm de espessura que, através de uma calandra instalada no Laboratório de Fabricação da UBI (FabLab), adquiriu a forma tubular (Figura 4.2). Posteriormente, com uma serra de esquadria, foi possível definir o ângulo entre as duas peças que foram devidamente fixadas, através de um cordão de soldadura do tipo MAG.



Figura 4.2- Planos da admissão após serem calandrados.

4.2.2 Câmara de Combustão

De forma a evitar um desperdício de material, foi utilizado para a secção cónica da câmara de combustão a mesma chapa que havia servido para a admissão. Numa primeira tentativa, experimentou-se enrolar o cone através de uma calandra numa oficina externa à universidade, no entanto, devido a esta ferramenta ser limitada para secções cilíndricas em vez de secções cónicas, o esforço falhou. A alternativa passou por enrolar o cone manualmente com a ajuda prestada pelos serralheiros dos serviços técnicos da UBI. Após a costura de solda ao longo do tronco cónico, seguiu-se a abertura de um orifício na parede, de forma a permitir a passagem

do escoamento desde a admissão até ao interior da câmara de combustão. Por fim, a parede em forma de calota esférica foi aproveitada da base de um reservatório de pó químico, com 9 kg , para extinção de incêndios. A Figura 4.3 apresenta a configuração da câmara de combustão com a admissão agregada.



Figura 4.3- Câmara de Combustão.

4.2.3 Escape

Num primeiro esforço, tentou-se obter a forma cilíndrica da tubeira de escape através de uma calandra, tal como o método usado para construir a admissão. No entanto, pelo facto da calandra existente nas instalações da universidade não estar habilitada para produzir as dimensões pretendidas, foi necessário recorrer a uma indústria de perfis em aço. Assim, entre os modelos padronizados existentes, obteve-se um tubo com costura em aço inoxidável 304, com 60 mm de diâmetro externo e $1,8\text{ mm}$ de espessura (Figura 4.4). Como consequência, houve uma penalização de cerca de 3 mm em relação ao diâmetro interno de projeto.



Figura 4.4- Ducto de Escape.

4.3 Banco de Ensaio

De forma a permitir estabilizar o pulsojato e, como tal, garantir a segurança durante os ensaios estáticos do mesmo, tornou-se necessário desenvolver uma estrutura capaz de resistir às elevadas vibrações a que este tipo de propulsor costuma estar sujeito. Assim sendo, o banco de ensaios foi construído com base num conjunto de elementos de perfil em aço de secção quadrada $16 \times 16 \text{ mm}$, unidos com recurso a soldadura por arco elétrico. Outro requisito exigido, era permitir um fácil desacoplamento entre o motor e o banco de ensaios para a eventualidade de ser necessário fazer algum tipo de reparação ou manutenção no pulsojato. Para isso, optou-se por suportar o motor a reação através de duas abraçadeiras metálicas com aperto por parafusos, em torno do ducto de escape.

Tendo em vista a medição da força de tração desenvolvida pelo motor, foi necessário instalar sobre o banco duas calhas com rolamentos, de forma a transmitir diretamente essa mesma força para a célula de carga. Posto isto, instalou-se, acima das calhas deslizantes, um vagão capaz de, não só suportar o peso do motor, como também com o propósito de afastá-lo das mesmas. A elevada energia térmica produzida pelo propulsor comprometeria a integridade das calhas, uma vez que estas são compostas por rolamentos plásticos. Assim, o pulsojato foi elevado em 18 cm de forma a aumentar a dissipação de calor para a vizinhança e, com isto, garantir um valor confiável da tração, transmitido à célula de carga através de um cabo de aço.

A estrutura do banco de ensaios foi fixa a uma mesa de trabalho, através de três grampos de pressão. Desta forma, o banco não fica preso de forma permanente e permite que seja facilmente transportado ou até transferido de bancada. A Figura 4.5 apresenta a configuração do banco de testes desenhado através do *software* CATIA V5R20, desenvolvido pela Dassault Systèmes.

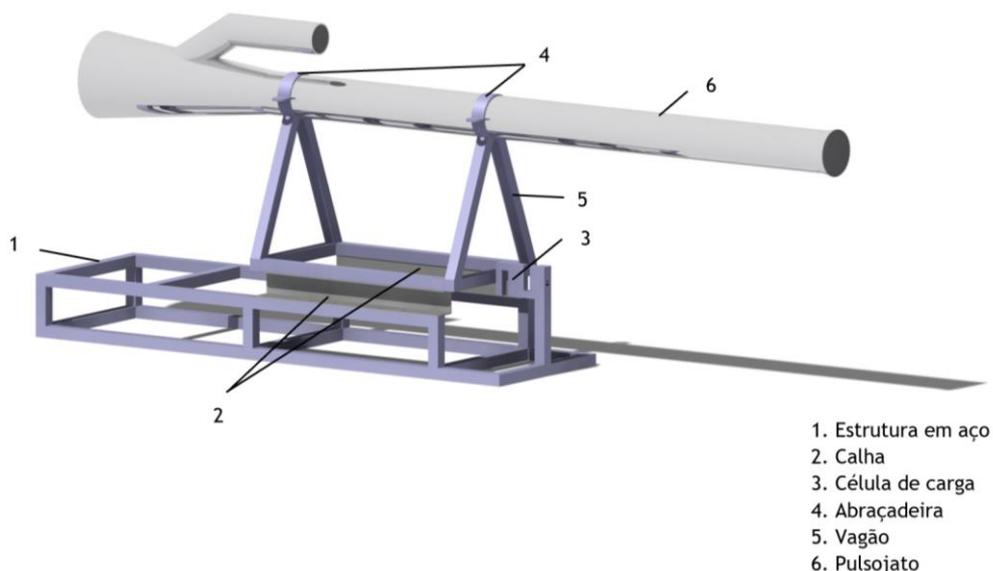


Figura 4.5- Pulsojato instalado sobre o banco de ensaios.

4.4 Sistemas Complementares

A operação do pulsojato depende de três sistemas adicionais: sistema de ignição, sistema de combustível e sistema de ar comprimido. Primeiramente, o sistema de ignição foi ativado, seguindo-se a abertura da válvula de combustível e, por último, o ar comprimido favoreceu a difusão da mistura no interior da câmara. Claro está que diversas configurações destes sistemas foram testadas até a operação do motor ter sido alcançada e, nesse sentido, os sistemas que aqui se expõem são o resultado de todas essas tentativas. A descrição do percurso seguido até obter a configuração final dos sistemas complementares, pode ser consultada na secção 4.5.

4.4.1 Sistema de Ignição

De modo inflamar a mistura ar-combustível no início da operação do pulsojato, uma faísca de alta tensão é descarregada diretamente na câmara de combustão, através de uma vela de ignição. Para despontar a descarga elétrica, foi adquirido um módulo de ignição de 20 kV com uma frequência de descarga de 16 Hz, alimentado por uma bateria de 3 células de polímeros de lítio, com 11.1 V e 2100 mAh de capacidade. A vela, uma CMR6H da NGK, tipicamente utilizada na indústria automóvel, foi instalada na parede do motor em forma de calota esférica e, uma vez que a espessura da parede era insuficiente para fixá-la, recorreu-se a uma porca metálica sextavada com o intuito de aumentar a parede roscada capaz de apoiar a vela. Após a abertura de uma rosca M 10 × 1 mm na porca sextavada, esta foi soldada à parede da câmara de combustão. Na Figura 4.6 está representado o esquema de ignição utilizado.

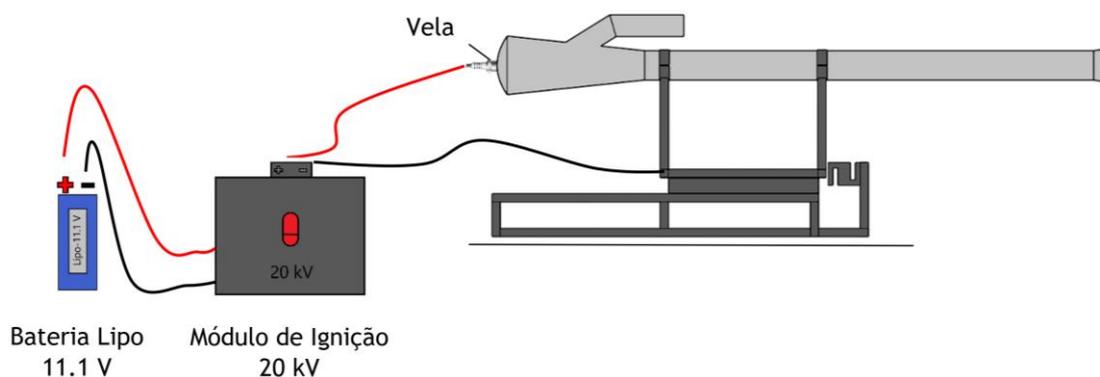


Figura 4.6- Sistema de ignição.

No momento em que o módulo de ignição é ativo, uma corrente de 20 000 V flui pelo terminal positivo até à vela, provocando uma faísca intermitente de alta frequência, enquanto o terminal negativo conectado à massa comum, neste caso, o banco de ensaios, responsabiliza-se por absorver toda a carga. Claro está que, apesar do sentido real da corrente elétrica ser desde o pólo negativo para o positivo, esta descrição tem em conta o sentido convencional da corrente. Após a autossustentabilidade do pulsojato ser alcançada, o sistema de ignição é desligado.

4.4.2 Sistema de Injeção de Combustível

O funcionamento de um pulsojato privilegia-se por não se restringir a um tipo de combustível específico. Dado que o uso de combustíveis líquidos exige que sofram pré vaporização antes de alcançarem o interior da câmara de combustão e, além disso, necessitam de uma bomba de pressurização, foi escolhido para alimentar o pulsojato sem válvulas, combustível GPL. Desta forma, a escolha restringia-se entre butano (C_4H_{10}) ou propano (C_3H_8). Tendo em conta que, para a mesma temperatura ambiente, um reservatório de propano contém maior pressão interna e maior poder energético [30], o butano foi descartado. Além disso, um reservatório de propano permite usar todo o combustível nele contido, o que não acontece com o butano, em que uma quantidade residual permanece armazenada.

Um reservatório contendo 9 kg de C_3H_8 a uma pressão média de 9 bares , tendo em conta a temperatura ambiente, foi utilizado para alimentar o pulsojato. De forma a permitir regular o caudal mássico de combustível injetado na câmara de combustão, foi instalado no topo do reservatório de propano um redutor industrial. Ainda antes do combustível atingir a câmara, existe uma válvula de corte rápido que permite, de forma segura, cancelar por completo o fluxo de combustível, fundamental ao funcionamento do motor. Finalmente, o C_3H_8 é libertado pelo injetor ao longo do ducto de admissão que alcança, posteriormente, a câmara de combustão.

A geometria do injetor consiste, simplesmente, numa secção tubular aberta que se revelou, entre as configurações testadas, a mais eficaz, tal como explicitado na secção 4.5. A linha de alimentação de combustível, bem como o injetor, são feitos em tubo de cobre, de 4 mm de diâmetro interno, uma vez que apresenta um ponto de fusão superior a 1000°C , capaz de resistir às elevadas temperaturas que o propulsor promove. De salientar que, tal como foi averiguado durante os ensaios, a operação do pulsojato é bastante suscetível à posição do injetor e, por isso, recomenda-se que este penetre em 1 cm a admissão. Para uma melhor compreensão, segue-se a Figura 4.7.

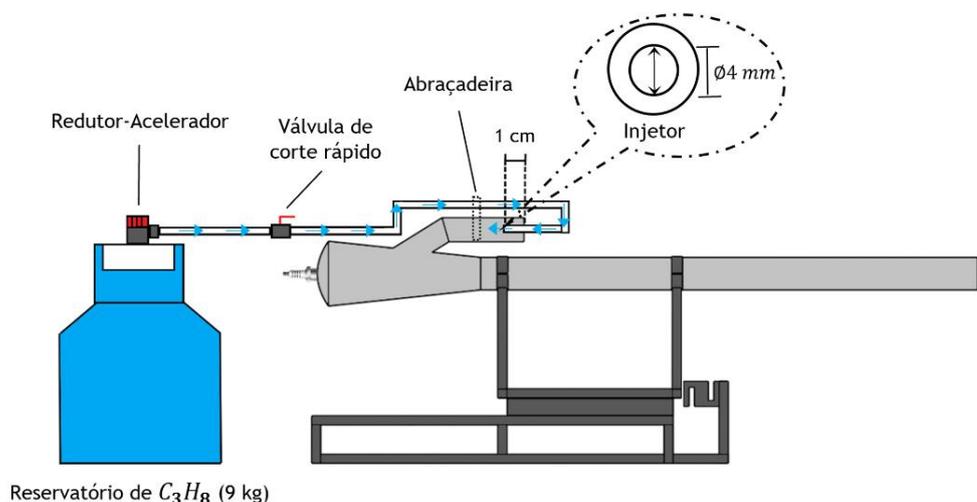


Figura 4.7- Sistema de injeção de combustível.

4.4.3 Sistema de Ar Comprimido

No momento de iniciar o motor pulsojato, é exigido que seja impingido um determinado caudal de ar para a câmara de combustão de forma a despontar a explosão no seu interior. Assim sendo, foi utilizado um compressor de ar, instalado no hangar do Departamento de Engenharia Aeronáutica da UBI, conectado a uma pistola capaz de controlar a pressão do ar aspirado pelo motor. Tal como o sistema de ignição, o ar comprimido é retirado quando o motor entra em modo autossustentável, em que a admissão de ar fica a cargo do vácuo parcial criado na câmara, pela elevada velocidade a que se dá o escape dos produtos da combustão.

4.5 Problemas Operacionais

O motor pulsojato não valvulado, precisamente pelo facto de não conter válvulas mecânicas que controlam o fluxo da mistura na câmara de combustão, faz com que a sua operação esteja bastante vulnerabilizada pelo dimensionamento. De facto, após a construção do pulsojato, existiu um conjunto de problemas que comprometeram a inicialização do seu funcionamento. Em seguida, são expostas as adversidades surgidas, bem como os métodos capazes de as solucionar, contribuindo assim para a operação do pulsojato.

4.5.1 Ignição

A primeira dificuldade que surgiu, logo durante o teste inicial do pulsojato, foi a incapacidade da inflamação da mistura ar-combustível, utilizando uma vela de quatro pólos conectada ao módulo de ignição de 20 kV. Em desconfiança que o problema fosse que a injeção de combustível estivesse demasiado afastada do ponto de descarga elétrica, aproximou-se o injetor de propano até breves milímetros antes da vela, no entanto, não existiu qualquer alteração com esta técnica. A alternativa passou por trocar a vela na expectativa de aumentar a intensidade da faísca elétrica, tendo sido utilizado para o efeito uma CMR6H NGK de pólo único. A pesar de tudo, o resultado permaneceu inalterado.

A solução efetiva passou por afastar o elétrodo neutro do elétrodo central, da vela referida anteriormente, com o objetivo de provocar uma faísca elétrica com maior comprimento e, assim, a ignição no interior do pulsojato foi bem-sucedida.

4.5.2 Efeito Pulsante Autossustentável

Uma vez resolvido o problema da inflamação da mistura, outro obstáculo surgiu comprometendo o alcance do efeito pulsante autossustentável, isto é, permitir operar o pulsojato sem o suplemento externo de ar comprimido. Este foi, sem dúvida, o problema que mais tempo e esforço exigiu até que a solução fosse encontrada. No intuito de contornar esta dificuldade, seguiram-se várias tentativas no sentido de perceber qual a influência de cada alteração no funcionamento do motor.

As condições em que foram realizados os primeiros ensaios incluíram um redutor doméstico com um caudal mássico constante de $0,4 \text{ g/s}$ de C_3H_8 , um injetor de combustível de secção tubular aberta instalado diretamente no interior da câmara de combustão e, além disso, o pulsojato ensaiado não tinha o divergente incluído na tubeira de escape.

A tentativa inicial passou por aumentar o comprimento da conduta de admissão na expectativa de aumentar a quantidade de ar que alimentava a combustão. Para o efeito, um tubo encaixado sobre o ducto de admissão permitiu inferir que, apesar do aumento da massa de ar não ter proporcionado o funcionamento autossustentável do pulsojato, a mistura estaria demasiado pobre, sendo necessário um ajuste na forma como o combustível estaria a ser entregue. Uma vez verificado que o excesso de ar enfraquecia a explosão, o acrescento que permitiu ampliar a admissão foi removido.

Nesta perspetiva, um novo conceito de injetor foi desenvolvido com a intenção de aumentar a capacidade de difusão da mistura na câmara de combustão. Assim, a extremidade aberta da linha de cobre foi selada e um total de 8 furos, 4 furos em cada um dos lados, de 2 mm de diâmetro e espaçados 10 mm entre si, foram perfurados perpendicularmente relativamente às paredes do tubo de cobre (Figura 4.8). Apesar do esforço para obter uma rápida uniformização da distribuição de combustível, na prática não se verificaram avanços significativos e, por isso, o injetor inicial foi recuperado.



Figura 4.8- Novo injetor desenvolvido.

Tendo-se verificado que o problema não estava na forma como o combustível era distribuído, agora tudo apontava para que a prioridade fosse enriquecer o caudal mássico de C_3H_8 . Com recurso a dois reservatórios de propano de 9 kg , cada um com um redutor de caudal de $0,4 \text{ g/s}$ instalado, foi possível aumentar para $0,8 \text{ g/s}$ o fluxo mássico de combustível na câmara. Os resultados mostravam-se satisfatórios, tendo-se verificado que, embora o propulsor ainda não funcionasse sem o suplemento de ar comprimido, o ruído de cada explosão no interior da câmara era significativamente mais energético. Com isto, denotava-se que o sucesso do pulsojato era fortemente dependente da quantidade de combustível injetado no seu interior.

Nesse sentido, substituíram-se os dois reservatórios, mencionados anteriormente, por apenas um, no entanto, em vez de um redutor doméstico, foi instalado sobre o depósito um redutor industrial com a intenção de enriquecer ainda mais a mistura. O elevado poder energético de cada pulso era evidente ao ponto de, pela primeira vez, se ter verificado que o pulsojato gerou tração suficiente para mover o vagão sobre as calhas do banco de ensaios. Ainda que se tivesse alcançado um avanço significativo, tudo isto ainda dependia da adição de ar.

Com o objetivo de verificar se, neste ponto da situação, o problema seria ter um déficit da quantidade de ar debitado pela pistola de ar comprimido, recorreu-se a um soprador de folhas a gasolina com o objetivo de aumentar o volume de ar aspirado para o interior do propulsor. Os ensaios mostraram que, com o soprador, existe um afastamento do ponto de estequiometria no sentido em que existe um empobrecimento da mistura, causado pelo excesso de ar admitido. Em virtude desta insatisfação, retomou-se a partida do pulsojato com recurso à pistola de ar.

Após todas estas tentativas, o objetivo de alcançar o efeito pulsante autossustentável do propulsor parecia ainda distante. Eis que surge a ideia de, em vez de injetar diretamente o combustível no interior da câmara de combustão, colocar o injetor ligeiramente introduzido no ducto de admissão, posicionado com o eixo central que o atravessa (ver Figura 4.7). Em consequência do novo posicionamento do ponto de injeção, constatou-se que existiu um aumento da energia química de cada ciclo, uma vez que as paredes da câmara de combustão atingiram o estado de incandescência, provocado pelas elevadas temperaturas. Além do mais, quando retirado o ar comprimido de partida, o pulsojato mantinha-se autossustentável por uns breves dois segundos, o que expectava que a solução estaria mais próxima.

Com o principal objetivo ainda por cumprir, um acrescento de 25 *cm* em tubo inox foi soldado à tubeira de escape na perspectiva de, por tentativa em erro, ir reduzindo o comprimento total do ducto propulsivo, até que resultasse no funcionamento do pulsojato. No momento em que já haviam sido subtraídos 6,5 *cm*, o motor ainda dependia do ar imposto na admissão para trabalhar.

Visto que a supressão no comprimento não resultava em qualquer alteração, suspeitou-se que seria necessária gerar um maior diferencial de pressão à saída da tubeira de escape, pois, desta forma, potenciava-se o vácuo parcial no interior da câmara, responsável pela ingestão de ar. Assim, instalou-se no extremo do ducto de escape um divergente que permitiu, finalmente, alcançar a autossustentabilidade do pulsojato. No Apêndice C.5 pode ser consultada a geometria do divergente aplicado.

4.5.3 Tração Constante

A nova configuração permitiu que o pulsojato operasse sem o suplemento de ar comprimido, no entanto ainda existiam dificuldades relativamente à sua operação. No momento em que se tentava acelerar o motor com a abertura da válvula redutora, o seu funcionamento era

imediatamente interrompido. Com isto, percebeu-se que quando a quantidade de combustível aumentava, o motor era incapaz de aspirar uma quantidade de ar proporcional, de forma a equilibrar a condição estequiométrica.

Na tentativa de resolver esta limitação, o mesmo ducto que já havia sido testado previamente, voltou a ser instalado sobre a admissão, com a intenção de alongar o seu comprimento e, por consequência, absorver mais ar. Além disso, de forma semelhante ao que se fez com a tubeira de escape, acrescentou-se um divergente na admissão de modo a promover um maior diferencial de pressão, favorável à adição de ar. Efetivamente, o aumento da admissão foi bem sucedido, ao ponto de ser possível abrir completamente a válvula redutora sem que o motor cessasse o seu funcionamento, algo que antes era impraticável.

4.6 Configuração Final do Pulsojato

Tendo em conta as diversas dificuldades anteriormente descritas, a configuração do pulsojato sofreu alterações relativamente ao modelo que havia sido inicialmente proposto, na secção 4.1. As principais diferenças consistem no prolongamento do ducto de admissão e escape em 4,7 cm e 18,5 cm, respetivamente, bem como a instalação de divergentes nestes mesmos ductos. A Figura 4.9 expõe as dimensões corrigidas do pulsojato ensaiado nesta investigação.

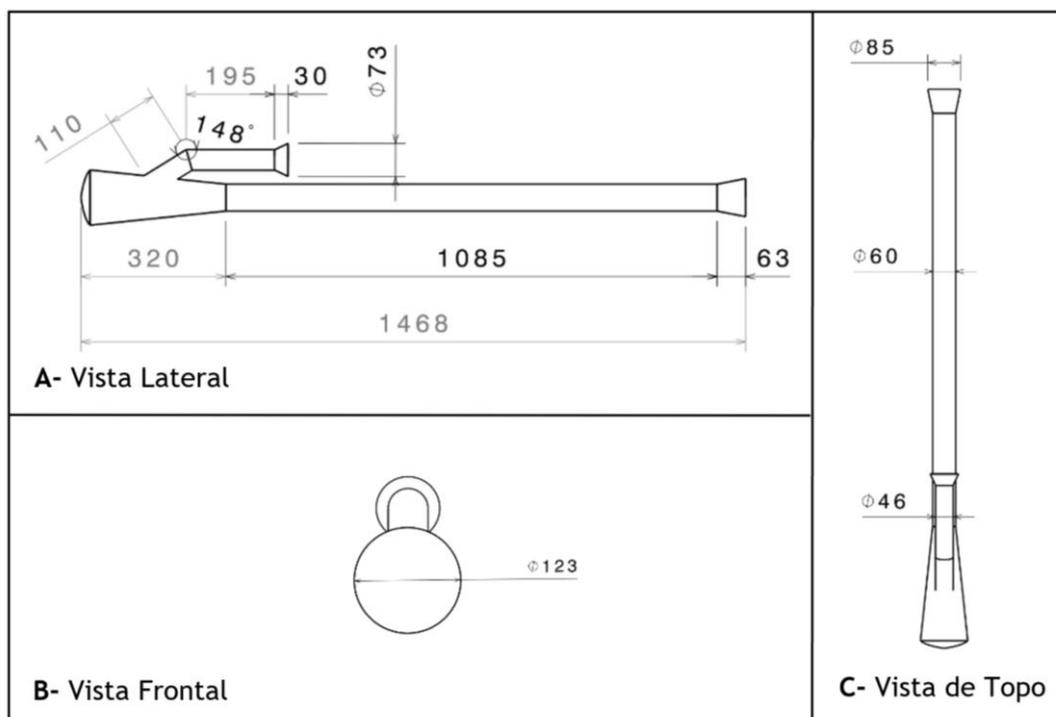


Figura 4.9- Configuração final do pulsojato, em mm.

Capítulo 5

5 Ensaio e Resultados Experimentais

A fase seguinte à construção do motor não valvulado, destinou-se a avaliar o desempenho e a analisar as condições características da sua operação. Desta forma, o quinto capítulo irá esclarecer qual o procedimento e os diferentes tipos de sensores que permitiram a aquisição dos dados experimentais, durante os ensaios estáticos do pulsojato. Por fim, serão mostrados os resultados que refletem o funcionamento do motor.

5.1 Instrumentos de Aquisição de Dados

Com vista em analisar o desempenho do pulsojato construído, seguiram-se um conjunto de testes em que diferentes propriedades físicas do seu funcionamento foram registadas ao longo do tempo. Entre estas, destacam-se a frequência, a tração, temperatura, consumo de combustível e, ainda, o nível de pressão sonora praticada pelo propulsor sem válvulas. Para tal, recorreu-se a uma série de sensores, instalados sobre pontos estratégicos do pulsojato, cujos dados medidos eram enviados, em tempo real, para uma placa *hardware*, no caso um Arduino Mega 2560. De seguida, são listados os vários sensores responsáveis pela aquisição de dados relativos ao motor pulsante.

5.1.1 Pressão Ambiente

A fim de registar a pressão ambiente do local onde se realizaram os ensaios do motor, recorreu-se a um sensor de pressão absoluta PBT-GF30 MAP Sensor, habitualmente usado na indústria automóvel para medir a pressão do ar no coletor de admissão, Figura 5.1. Entende-se por pressão absoluta aquela que tem como referência o vácuo total, sendo que este dispositivo permite que sejam feitas medições acima ou abaixo da pressão atmosférica. A calibração do presente sensor pode ser consultada no Apêndice B.3.



Figura 5.1- Sensor de pressão absoluta-PBT-GF30.

5.1.2 Temperatura

A monitorização da temperatura na câmara de combustão, realizou-se através de um termopar tipo “S” capaz de ler temperaturas entre $[-40,1760]$ °C, tendo sido instalado na parede em forma de calota esférica, posicionado 1 *cm* acima da vela de ignição. O amplificador MAX31856 encarregou-se de digitalizar o sinal proveniente do termopar para a placa de *hardware*.

Para além da câmara de combustão, houve necessidade de registar a temperatura nos ductos de admissão e escape para, através do método descrito na secção 3.8, determinar a frequência operacional do pulsojato. Dado que, as temperaturas características destas partes são bastante inferiores relativamente à câmara de combustão, foram utilizados dois termopares tipo “K”, com amplitude térmica de $[-260,1260]$ °C. Os sensores de temperatura foram instalados 2 *cm* a montante do ducto de admissão e, também, à mesma distância a jusante do ducto de escape. Desta vez, foram utilizados dois módulos MAX6675, responsáveis pela digitalização do sinal. A Figura 5.2, esclarece a localização dos pontos de medição da temperatura no propulsor não valvulado.

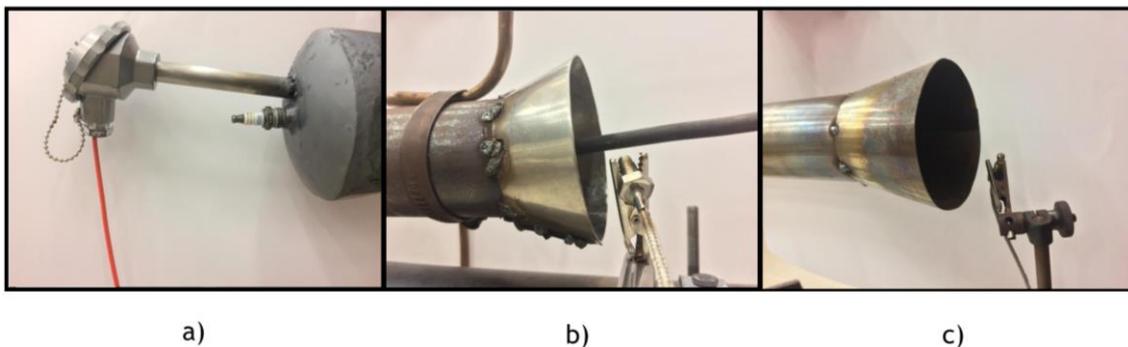


Figura 5.2- Localização dos termopares: a) -Câmara de combustão; b) -Admissão; c) - Escape.

5.1.3 Tração

A força de tração desenvolvida pelo pulsojato durante os ensaios estáticos, foi medida com recurso a uma célula de carga DYLY-103 tipo “S”, fixa à estrutura do banco de ensaios, Figura 5.3. No momento em que o jato pulsante expelido pelo motor consegue impulsionar este para a frente, por meio de um cabo de aço, a célula de carga é tracionada e, por sua vez, a deformação gerada no material que a constitui é convertida num sinal elétrico, através de extensómetros. A conversão do sinal analógico para digital proveniente da célula de carga, limitada a 10 *kg*, ficou a cargo do módulo HX711. No Apêndice B.1, encontra-se a calibração da célula de carga afeta à medição da tração.



Figura 5.3- Célula de carga DYLY-103, limitada a 10 kg .

5.1.4 Caudal Mássico de Combustível

A medição do caudal mássico de combustível gasoso, fez-se indiretamente pela medição da variação da massa do reservatório de propano ao longo do tempo. Neste sentido, foi desenvolvida uma plataforma em aço, de perfil quadrado $16 \times 16 \text{ mm}$, com o propósito de suportar o tanque de propano sobre uma célula de carga, destinada a registar as variações mássicas. Assim, a diferença do peso do reservatório, apoiado diretamente sobre o tabuleiro, dividido pelo intervalo de tempo do ensaio em causa, permitiu quantificar o caudal mássico de combustível injetado no pulsojato. Para o efeito, utilizou-se uma célula de carga DYLY-103 tipo “S”, restrita a uma carga máxima de 20 kg que, do mesmo modo usado na medição da tração, foi conectada a um módulo HX711. O funcionamento deste equipamento, rege-se pela reta de calibração exposta no Apêndice B.2. A Figura 5.4 expõe a configuração da plataforma, desenhada através do *software* CATIA V5R20.

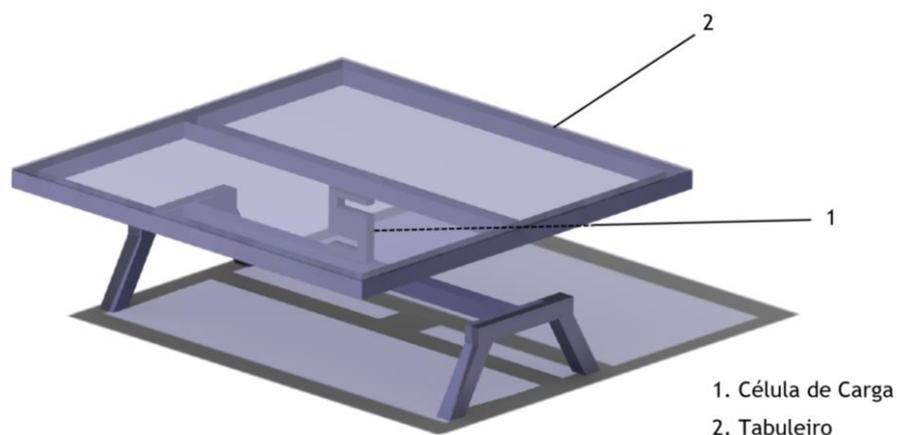


Figura 5.4- Plataforma para medição do caudal mássico de combustível.

5.1.5 Nível de Pressão Sonora

A operação de um motor de deflagração por pulsos, é caracterizada pelo elevado ruído por ele praticado e, nesta perspectiva, efetuou-se a medição do nível de pressão sonora (dB's), com o sonómetro SW-524. As medições recolhidas pelo sonómetro foram posteriormente analisadas, através do *software* Noise Meter. Além disso, a gravação do som emitido pelo pulsojato permitiu, através do *software* Audacity versão 2.3.3, inferir a frequência real do pulsojato e, assim, comparar com os valores calculados através do método descrito na secção 3.8. Neste sentido, o sonómetro foi colocado num ponto fixo, distanciado do ducto propulsivo em 1,20 m e orientado 40°, relativamente ao plano de simetria do motor. A capacidade de medição do sonómetro SW-524, estende-se entre $[30,130] \pm 1,5 \text{ dB}$ e permite dois tipos de ponderação relativamente à frequência, "A" ou "C". Neste caso, uma vez que se pretende uma curva cuja sensibilidade seja, o quanto possível, independente da frequência do som emitido, foi predefinida a ponderação tipo "C".



Figura 5.5- Sonómetro SW-524.

5.2 Filtro de Kalman Aplicado às Medições

Durante os primeiros ensaios realizados para recolha de dados do motor pulsojato, verificou-se que o conjunto de valores, provenientes dos diversos tipos de sensores descritos na secção anterior, apresentavam uma considerável percentagem de ruído associado, capaz de dificultar a interpretação das curvas de desempenho do propulsor. Neste sentido, foi necessário desenvolver um filtro de Kalman, aplicado ao conjunto de variáveis adquiridas, capaz de diminuir a incerteza das medições. O algoritmo do filtro de Kalman, Figura 5.6, tem por base duas etapas, sendo que inicialmente é previsto o vetor de estado x_k e, posteriormente, a estimativa inicial é atualizada através do conjunto de valores observáveis, representado por Z_k .

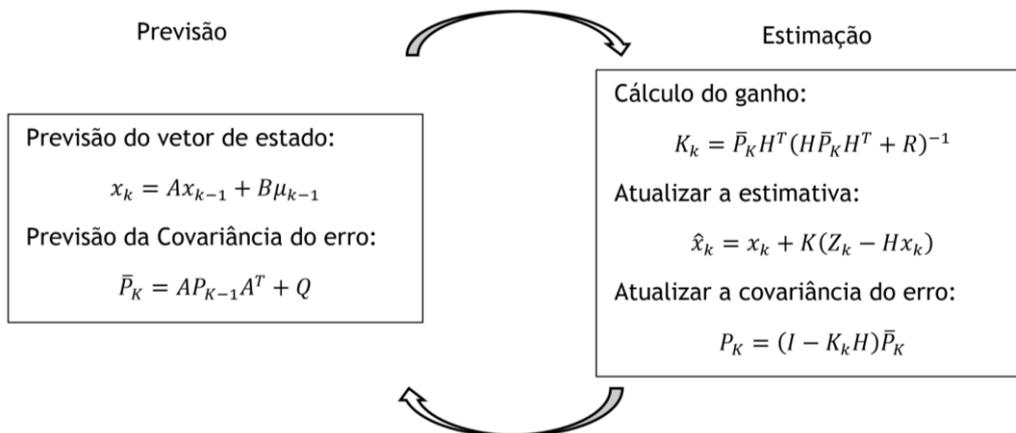


Figura 5.6- Algoritmo genérico do filtro de Kalman.

Uma vez que não existe intenção que o filtro implementado exerça controlo sob as variáveis medidas, conjecturou-se o vetor de controlo $\mu_k = 0$. Considerando o modelo de estados $A = 1$, um baixo valor de covariância do ruído do processo e da observação, $Q = 1 \times 10^{-5}$ e $R = 0,01$, respetivamente e, ainda, o modelo de observação $H = 1$, resulta o seguinte modelo de filtragem, Figura 5.7.

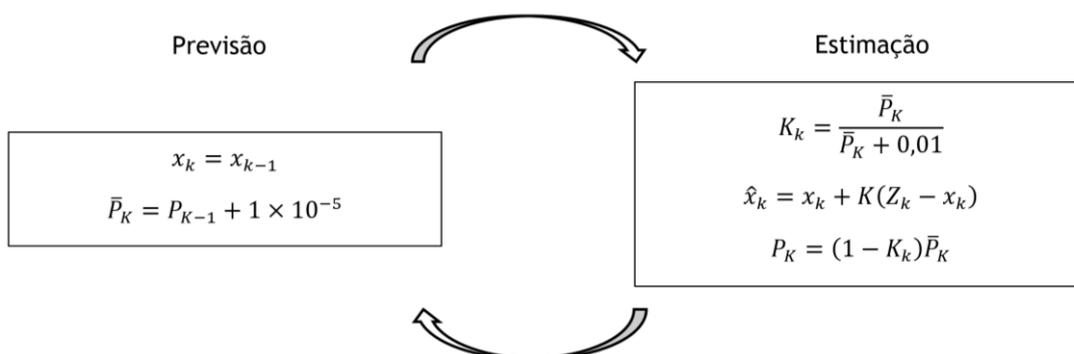


Figura 5.7- Filtro de Kalman, aplicado ao conjunto das medições.

No caso concreto, o vetor das observações, Z_k , possui seis elementos, provenientes da aquisição de dados por parte dos diferentes tipos de sensores.

$$Z_k = \begin{bmatrix} \textit{Temperatura_1} \\ \textit{Temperatura_2} \\ \textit{Pressão ambiente} \\ \textit{Tração} \\ \textit{Massa de propano} \\ \textit{Temperatura_3} \end{bmatrix}$$

Para a primeira iteração, foram pressupostos os seguintes valores do vetor de estado e de covariância do erro, respetivamente.

$$x_{k-1} = \begin{bmatrix} 25 \\ 25 \\ 93 \\ 2000 \\ 9000 \\ 40 \end{bmatrix}, \quad P_{k-1} = 1$$

Na secção 5.4, serão demonstrados casos práticos da atuação do filtro de kalman, comparando-se os sinais filtrado e não filtrado.

5.3 Procedimento Experimental para Aquisição de Dados

Os ensaios estáticos realizados para o estudo do motor pulsojato, tiveram lugar no laboratório de propulsão da UBI, no entanto, devido à inexistência de um sistema exaustor dos gases de escape, foi necessário proceder os testes junto à porta contígua ao exterior. Desta forma, evitava-se a acumulação de gases inflamáveis, capazes de perturbar todo o ambiente do laboratório. A Tabela 5.1 resume as propriedades do ar aquando da realização dos ensaios.

Tabela 5.1- Propriedades do ar ambiente.

Temperatura (K)	282,15
Pressão Atmosférica (Pa)	90000

Antes de iniciar a operação do propulsor, garantiram-se todas as condições de segurança, nomeadamente a averiguação dos grampos responsáveis por fixar a estrutura do banco de ensaios, a utilização de luvas resistentes a altas temperaturas por parte do operador e, ainda, o uso de protetores auditivos antirruído, devido à elevada poluição sonora característica deste tipo de motores.

Uma vez verificadas as condições de segurança, procedeu-se à inicialização do motor, através da seguinte ordem cronológica:

- Despontar a faísca na vela de ignição
- Injeção de C_3H_8
- Impingir ar comprimido pela admissão

De modo a registar os parâmetros de desempenho do propulsor em diferentes regimes operacionais, procederam-se vários ensaios com diferentes caudais mássicos de propano injetados no motor. Para cada ensaio foram gravados os dados relativos à temperatura da câmara de combustão (Temperatura-1), temperatura da admissão (Temperatura-2), temperatura de escape (Temperatura-3), força de tração, caudal mássico de combustível debitado, nível de pressão sonora e, ainda, a pressão e temperatura relativas ao ar ambiente.

Relativamente ao método de obtenção de dados, com exceção do sonómetro SW-524, cuja aquisição do nível de pressão sonora obteve-se diretamente com o *software* Noise Meter dB, o restante conjunto de sensores foi conectado a uma placa Arduíno Mega 2560 que permitiu,

através de um código desenvolvido em *software* ARDUINO IDE-versão 1.8.8 (Apêndice A), a leitura e armazenamento das medições, em intervalos de tempo de 5 milissegundos. Posteriormente, com vista a facilitar a análise dos dados recolhidos, estes foram transcritos para folhas de cálculo, em Microsoft Excel 2019. A Figura 5.8 elucida a disposição dos diferentes equipamentos instalados em redor do pulsojato.

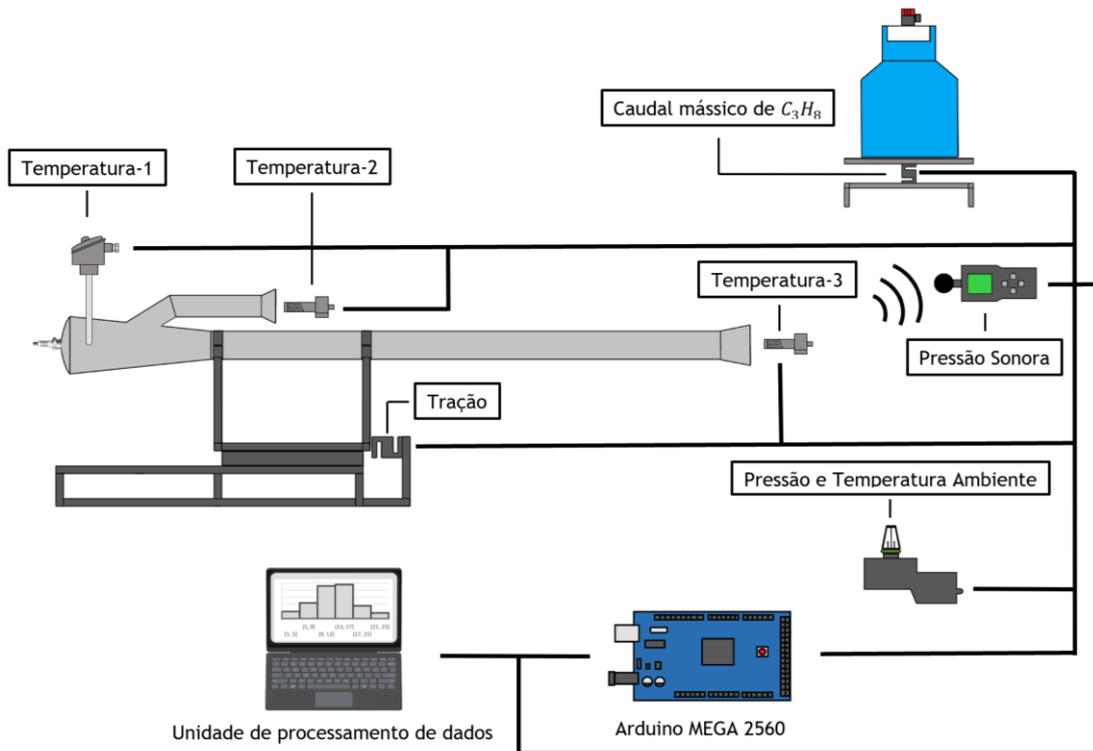


Figura 5.8- Aparato Experimental para a aquisição de dados.

5.4 Resultados

Os resultados expostos em seguida, refletem o comportamento do pulsojato para diferentes condições de acelerador, desde os pulsos iniciais, característicos da inicialização deste tipo de motores, até à operação estável, em regime de combustão autossustentada. De salientar que em todos os ensaios realizados, o funcionamento autossustentável foi alcançado com sucesso. A presente secção subdivide-se de acordo com os diferentes parâmetros medidos e, de forma a caracterizar o desempenho do pulsojato não valvulado em diferentes condições de aceleração, serão apresentados gráficos e tabelas que reúnem toda a informação relativa aos ensaios estáticos.

5.4.1 Caudal Mássico de C₃H₈

O caudal mássico de combustível que alimentou o pulsojato durante os ensaios, foi regulado através do redutor instalado sobre o tanque de propano, assimilando-se ao funcionamento de uma borboleta. Uma vez definidas várias posições de acelerador, foi possível quantificar a quantidade de propano entregue ao motor, através da variação, no tempo, da massa do tanque

de propelente. A título de exemplo, segue-se, na Figura 5.9, o registo temporal da variação da massa do reservatório, durante um dos ensaios realizados.

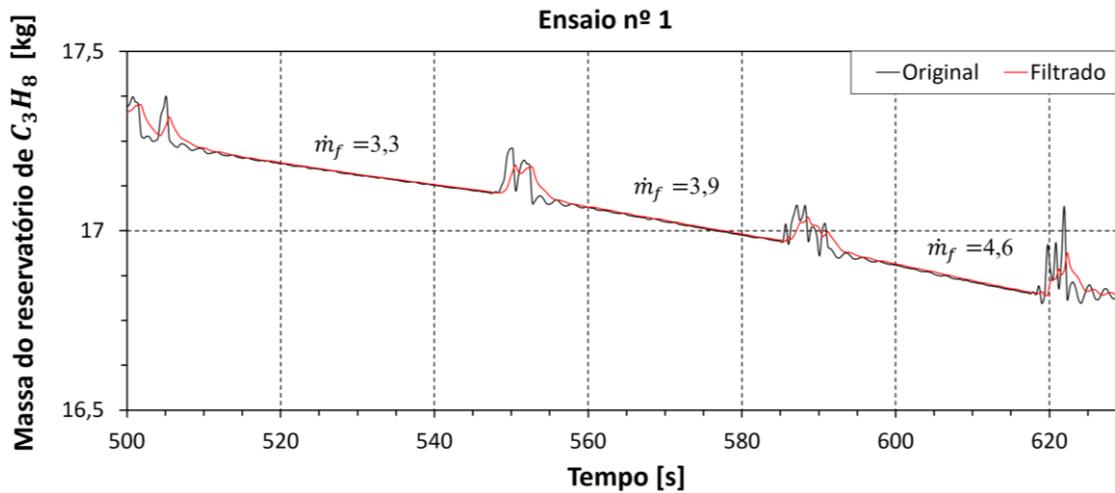


Figura 5.9- Massa do tanque de propano com o tempo, ensaio $n^{\circ}1$.

Na Figura 5.9, é possível observar a existência de três retas que, apesar de parecer pouco perceptível, apresentam diferentes declives, ou seja, correspondem a diferentes caudais mássicos. Além disso, as perturbações observadas na transição entre retas, correspondem a ruído originado pela força exercida pelo operador sobre o redutor, a fim de poder alterar a porção de aceleração. Ainda relativamente à figura anterior, é notável a atuação do filtro de Kalman na eliminação do ruído associado às medições da célula de carga, facilitando o cálculo dos declives de cada reta representada.

Com tudo isto, foi possível definir sete fluxos mássicos de propano para estudo do desempenho do pulsojato: 1,4, 1,8, 3,3, 3,9, 4,6, 7,1 e 7,7 g/s. De realçar que, para alcançar os dois últimos caudais mais elevados, existiu a necessidade de utilizar, simultaneamente, dois reservatórios de propano em paralelo.

5.4.2 Temperatura

Os termopares estrategicamente instalados no ducto de admissão, escape e câmara de combustão, permitiram perceber a evolução da temperatura nas principais zonas do pulsojato. Na Figura 5.10, é apresentado um exemplo do desenvolvimento da temperatura registada para cada uma das três partes mencionadas. De salientar que, uma vez que os sinais original e filtrado apresentaram a mesma evolução, apenas o sinal original é mostrado.

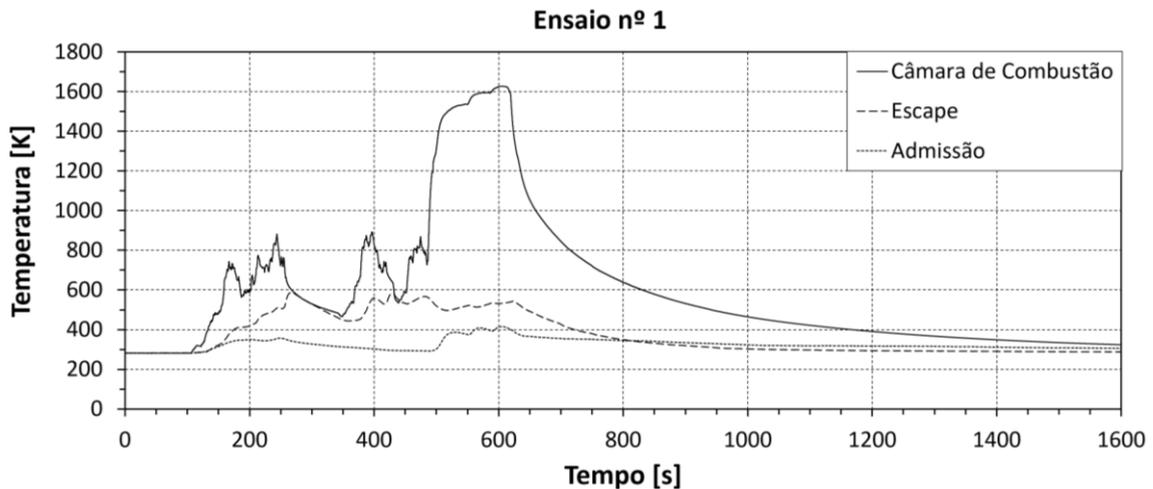


Figura 5.10- Evolução das temperaturas de admissão, escape e câmara de combustão, no ensaio nº1.

Nos primeiros 500 s da figura anterior, é claro o início da operação do pulsojato, caracterizada por pulsos intermitentes ao longo do tempo onde, gradualmente, a temperatura das paredes da câmara de combustão e do ducto de escape vão aumentando. O mesmo não se verifica na temperatura de admissão, uma vez que o ar comprimido, necessário à inicialização do motor, impingido ao longo do ducto de admissão, é responsável por arrefecer o ar que envolve este mesmo ducto. Após este período de tempo, as paredes do pulsojato atingiram um valor suficientemente elevado, que permitiu a operação em regime de combustão autossustentada.

Desta forma, o período de tempo entre 500 e 620 s, corresponde ao funcionamento estável do propulsor, autossustentável, onde o ar comprimido se tornou dispensável. Durante este intervalo de tempo, o motor foi testado em três regimes de aceleração diferentes, quantificados na Figura 5.9, manifestando cada uma das curvas três saliências que correspondem a este mesmo facto. Durante o ensaio nº1, a variação do caudal mássico de combustível de 3,3 para 4,6 g/s, permitiu aumentar a temperatura da câmara de combustão de 1536,15 para 1627,15 K. Este aumento de temperatura permite contrariar algumas opiniões que sugerem que os motores pulsojato operam em regime constante, não sendo possível acelerá-los. Após o corte da injeção de combustível, no instante 620 s, o decaimento da temperatura com o tempo assemelha-se ao comportamento de uma função exponencial.

Os dados relativos à evolução da temperatura para os diversos caudais mássicos de propano testados, encontram-se representados na Figura 5.11, onde cada ponto traduz a máxima temperatura registada para cada um dos três componentes do pulsojato. Através desta figura, verifica-se que, à medida que o caudal de combustível aumenta, as temperaturas nas diferentes partes do pulsojato tendem a aumentar. Excecionalmente, observa-se que para o aumento do fluxo de combustível de 1,4 para 1,8 g/s, corresponde a um abaixamento da temperatura de escape. Isto poder-se-á ter devido a um desvio da posição original do termopar durante o ensaio estático, provocado pela velocidade do escoamento sobre este.

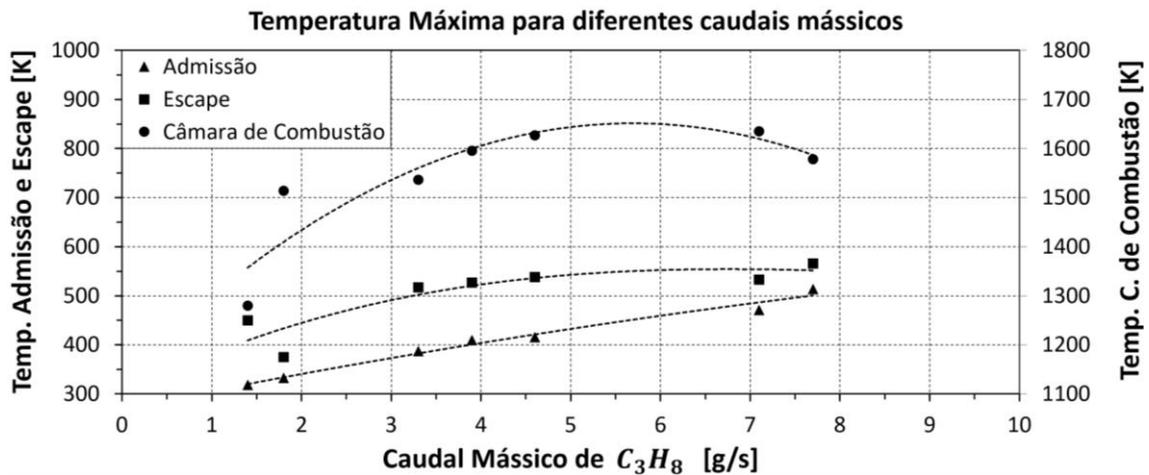


Figura 5.11- Evolução da temperatura para diferentes condições de aceleração.

Como era expectável, as temperaturas mais elevadas registaram-se na câmara de combustão, seguindo-se a tubeira de escape e, por último, a admissão apresenta os valores de temperatura mais baixos. Um olhar atento sobre as temperaturas características da câmara de combustão, permite perceber que, durante os testes, as paredes da câmara aproximaram-se da temperatura de fusão do aço, ou seja, cerca de 1700 K. Desta forma, uns breves segundos após o início do funcionamento do pulsojato, a câmara de combustão entrava em estado de incandescência (ver Figura 5.12). Por este motivo, os ensaios estáticos realizados ao motor não valvulado, não puderam exceder o limite de cerca de 2 minutos, a fim de preservar ao máximo a integridade da câmara de combustão.

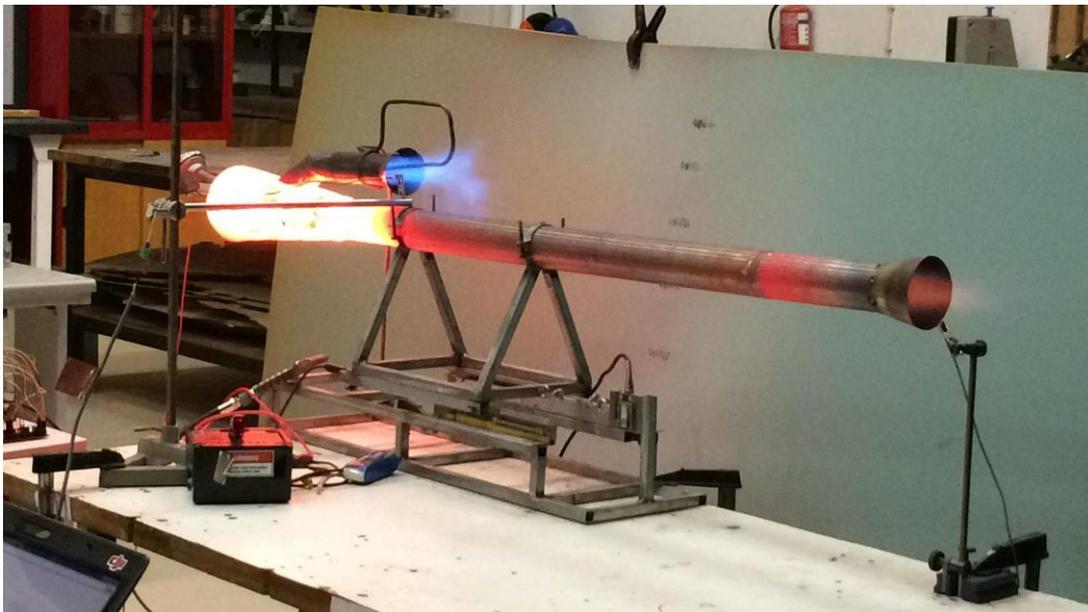


Figura 5.12- Pulsojato durante um ensaio estático.

5.4.3 Tração

A célula de carga instalada sobre o banco de ensaios, permitiu medir a força de tração desenvolvida pelo pulsojato não valvulado. Uma vez mais, a título de exemplo, expõem-se na Figura 5.13 as leituras dos valores de tração, relativas ao ensaio $n^{\circ}1$. De forma semelhante ao registo da temperatura, também os valores de tração relativos aos primeiros 500 s, traduzem o iniciar do motor, caracterizado por um regime pulsante e intermitente. Entre 500 e 620 s, correspondente ao funcionamento autossustentável, testemunham-se diferentes comportamentos da tração, de acordo com os três caudais mássicos testados neste ensaio: 3,3, 3,9 e 4,6 g/s de propano.

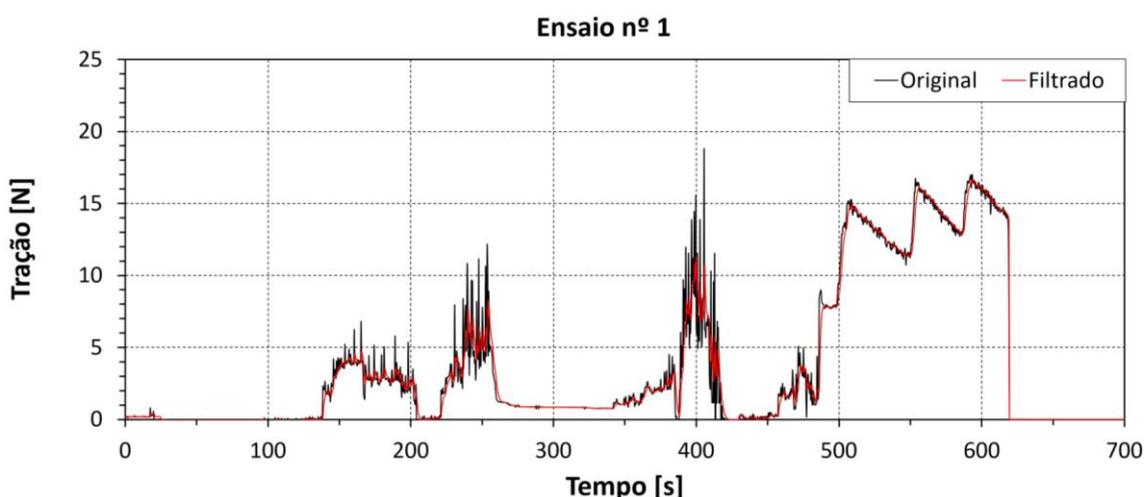


Figura 5.13- Força de tração, durante o ensaio $n^{\circ}1$.

A análise da figura anterior, em conjugação com a Figura 5.9, permite inferir que, o aumento do caudal mássico expressa um aumento da tração gerada, no entanto, a força produzida pelo propulsor decai, para cada caudal, ao longo do tempo. Este facto, evidenciado pelo declive negativo das três retas presentes no intervalo de 500 a 620 s, poderá dever-se à diminuição da pressão de injeção de combustível, uma vez que os reservatórios de GPL sofrem da incapacidade de conseguir debitar uma pressão constante no tempo. Quer isto dizer que, o decaimento da tração com o tempo poderá estar relacionado com o uso de uma botija de propano perto do fim de vida, ou seja, com reduzida quantidade de gás no seu interior. Claro está que, para averiguar esta suspeita, deveriam ter sido feitas medições, relativamente à pressão de injeção do combustível.

A extensão do registo da tração, praticado pelo pulsojato, aos diversos caudais mássicos de combustível ensaiados, encontra-se representada na Figura 5.14, onde cada ponto traduz a tração média registada para cada caudal.

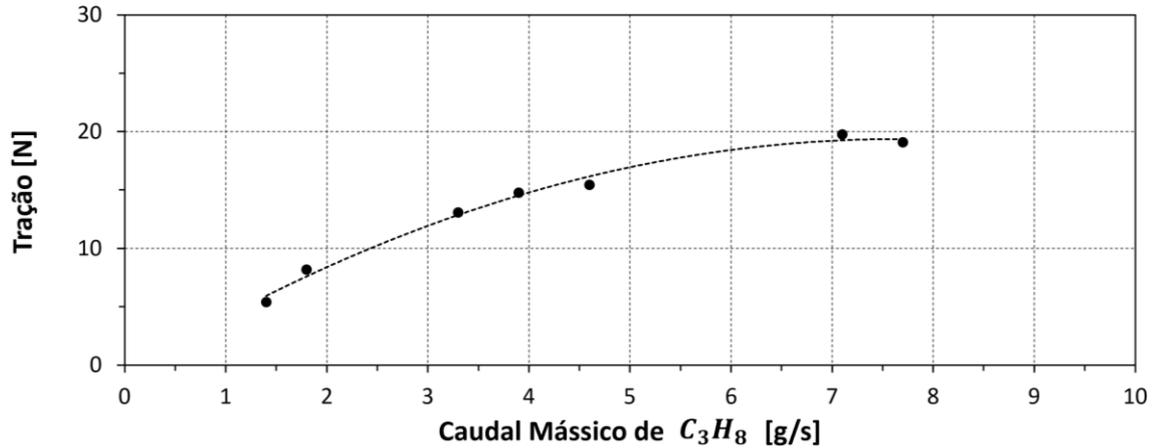


Figura 5.14- Tração produzida com o caudal mássico de combustível injetado.

Uma primeira impressão sobre a figura anterior, é que o aumento do caudal de propano injetado no motor, conduz ao aumento da força de tração por ele gerada. Isto vai de encontro aos resultados simulados numericamente por Melo [36] e, também, com os ensaios experimentais realizados a um motor pulsojato não valvulado, de 1,60 m de comprimento total [39].

Relativamente aos limites de operação do propulsor, verificou-se que a injeção de um caudal inferior a 1,4 g/s de C_3H_8 , torna muito difícil alcançar o efeito autossustentável sem o suplemento de ar comprimido. Por outro lado, o limite superior de operação não foi encontrado durante os testes estáticos, quer isto dizer que, mesmo na condição de acelerador a 100 %, até mesmo com duas botijas em uso, o pulsojato continuava a trabalhar autossustentável. Isto poderá criar a hipótese que se mais combustível fosse introduzido no pulsojato, o valor de tração poderia aumentar.

A Figura 5.14 vem, uma vez mais, corromper as opiniões de que os motores pulsojato não permitem ser acelerados. O aumento do caudal mássico de 1,4 para 7,7 g/s, provocou o incremento da força de tração de 5,40 para 19,07 N, não deixando dúvidas quanto à operação dos pulsojatos para diferentes condições de acelerador.

Uma constatação interessante é que, para os vários caudais mássicos de propano testados, a tração e a temperatura da câmara de combustão seguem a mesma tendência, suspeitando-se que estas estejam intimamente relacionadas, Figura 5.15. Este facto é alimentado pela diminuição, tanto da temperatura da câmara, como da tração, para o caudal mais elevado de 7,7 g/s. O decréscimo destas propriedades relativamente ao último ponto do gráfico, poderá estar relacionado com o fenómeno da queda de pressão que afeta os combustíveis GPL engarrafados, tal como mencionado anteriormente. Apesar do caudal de 7,7 g/s ter sido conseguido utilizando dois reservatórios de propano simultaneamente, a queda de pressão dever-se-á ao facto de estes conterem uma reduzida quantidade de gás no seu interior.

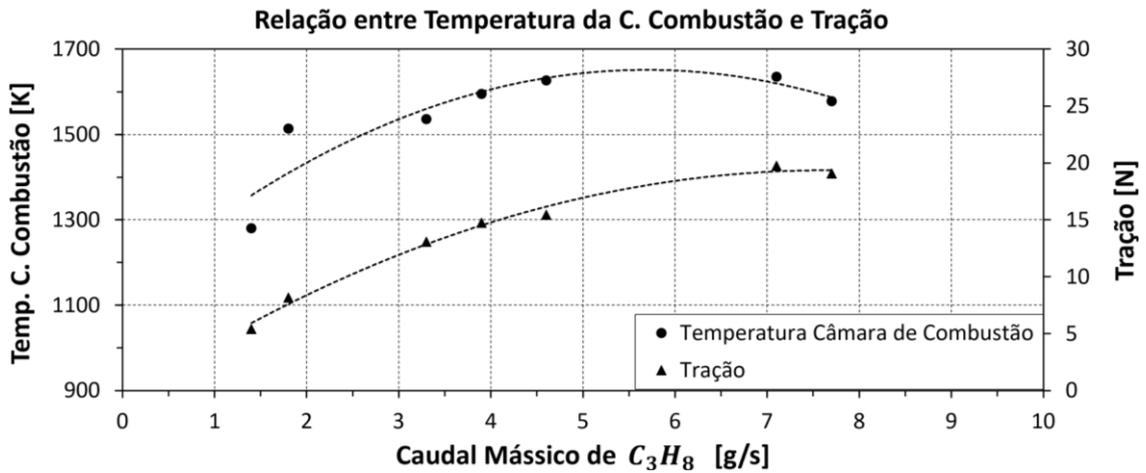


Figura 5.15- Correspondência entre a temperatura da câmara de combustão e a tração.

Apesar de não representado no gráfico da Figura 5.14, existiu um ensaio em que a tração superou qualquer um dos valores mencionados, proporcionando uma tração máxima de 26,14 N. O motivo pelo qual este valor não se encontra representado, é justificado pelo facto deste mesmo ensaio ter sido realizado numa fase inicial do projeto, em que ainda não estavam disponíveis todos os equipamentos, nomeadamente a plataforma para medição do caudal mássico de combustível. No entanto, a fim de registar aquele que foi o ensaio em que se obteve a máxima tração gerada pelo pulsojato, apresenta-se, na Figura 5.16, a evolução deste parâmetro ao longo do tempo.

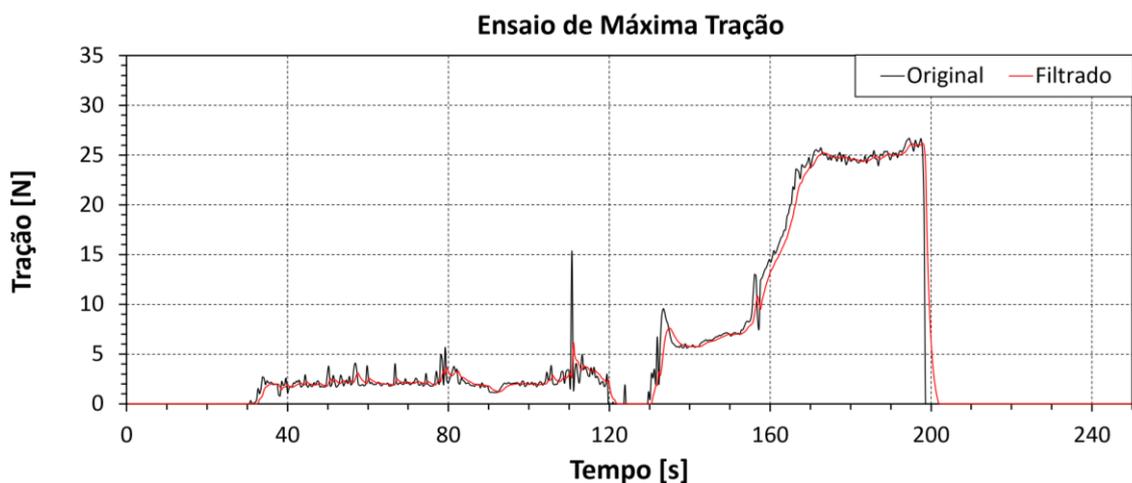


Figura 5.16- Tração máxima obtida pelo pulsojato.

Este ensaio permitiu ultrapassar o valor da tração máxima de 24,8 N, obtido pelas simulações numéricas [36] aplicadas ao modelo com a configuração descrita na secção 4.1. Apesar disso, a tração máxima obtida experimentalmente, 26,14 N, não conseguiu superar a tração estática máxima prevista pela teoria mencionada em 3.7, isto é, 46,6 N. Ainda relativamente ao ensaio da Figura 5.16, observa-se que durante o funcionamento em regime autossustentável, entre 170 e 200 s, a força de tração permaneceu praticamente constante no tempo, contrariando o

fenómeno registado no gráfico da Figura 5.13. Esta estabilidade na tração produzida, crê-se que possa dever-se ao facto de, durante o ensaio, ter sido utilizada uma botija de propano completamente cheia de gás no seu interior, permitindo uma maior pressão na injeção de combustível.

5.4.4 Consumo de Combustível

Com o objetivo de entender melhor acerca da quantidade de combustível consumido pelo pulsojato não valvulado, a Tabela 5.2 revela o consumo específico de tração, para os diversos estados de aceleração.

Tabela 5.2- Consumo específico de tração (TSFC) do pulsojato.

Caudal Mássico de C_3H_8 [g/s]	Tração Média [N]	TSFC [kg/(N.h)]
1,4	5,40	0,93
1,8	8,17	0,79
3,3	13,07	0,91
3,9	14,75	0,95
4,6	15,44	1,07
7,1	19,76	1,29
7,7	19,07	1,45

A primeira constatação resultante da análise da tabela anterior é que, para caudais mais reduzidos, o propulsor queima de forma mais eficiente o combustível responsável por gerar tração, enquanto que para caudais mássicos de propano mais elevados, o rendimento do motor tende a agravar-se. Em comparação com outros tipos de motores que servem atualmente a indústria aeronáutica, pode-se inferir que o desempenho do pulsojato testado, assemelha-se ao de um motor turbojato, caracterizado tipicamente por um consumo específico de tração na ordem da unidade.

A respeito do estudo numérico realizado por Melo [36], os valores do consumo específico de tração obtidos experimentalmente, encontram-se bastante abaixo dos previstos numericamente. Num tom de comparação, para o pulsojato gerar uma tração de cerca de 14 N é necessário, segundo as simulações numéricas, um caudal de 40 g/s de gás propano, enquanto experimentalmente, apenas é necessário um caudal mássico de, aproximadamente, 4,0 g/s. Quer isto dizer que, o consumo de tração dos testes experimentais é cerca de dez vezes menor que os exigidos pelo estudo numérico. Uma hipótese para este acontecimento poderá estar relacionada com a limitação do estudo numérico apenas ter sido simulado em 2D.

5.4.5 Frequência

A frequência operacional do pulsojato sem válvulas, registada experimentalmente através da gravação áudio pelo sonómetro, permite entender o número de ciclos executados pelo motor, por cada unidade de tempo. Neste sentido, a Figura 5.17 expõe um exemplo da determinação da frequência da operação do pulsojato, durante um ensaio estático, com recurso ao *software* de edição de áudio- Audacity 2.3.3.

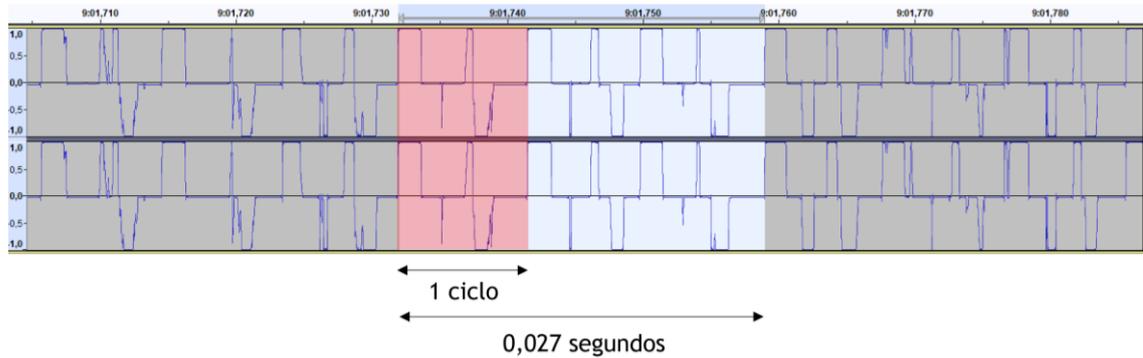


Figura 5.17- Exemplo de determinação da frequência operacional de 111 Hz, através do Audacity 2.3.3.

Uma vez que no período de tempo de 0,027 s registaram-se 3 ciclos, isto determina que, no exemplo anterior, o motor operou num regime de aproximadamente 111 Hz. Além disso, verifica-se que, para cada ciclo intercetado, existem duas ondas sonoras que, hipoteticamente, poderão estar associadas às ondas libertas pela conduta de admissão e de escape.

A fim de entender a influência da variação do caudal mássico de combustível na frequência operacional do pulsojato, a Figura 5.18 contém os dados da frequência relativos tanto ao método experimental, como ao método teórico descrito na secção 3.8, que sugere fazer uma média entre o número de ciclos executados pela admissão e pelo escape.

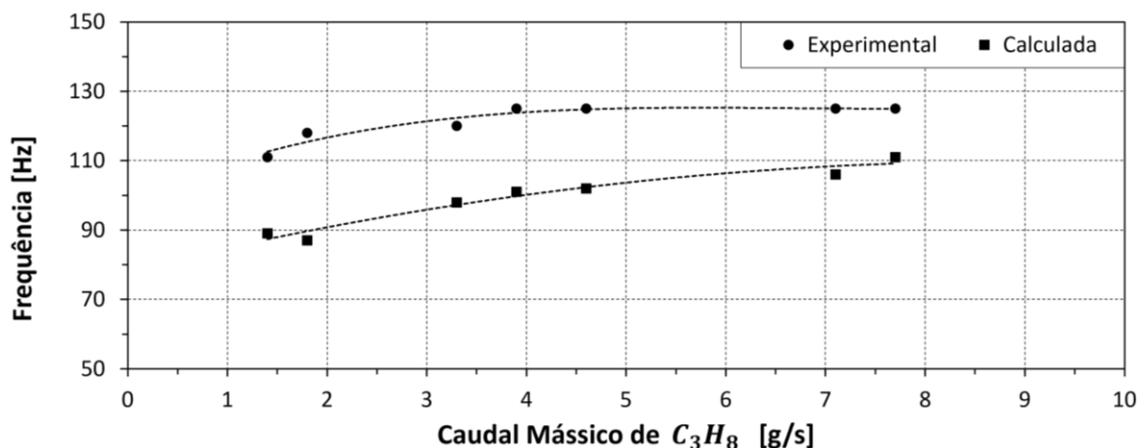


Figura 5.18- Frequência Experimental vs. Frequência Calculada.

No gráfico da Figura 5.18, destaca-se o facto de a frequência prevista pelos cálculos teóricos subestimar o número de ciclos efetuados, relativamente aos obtidos experimentalmente. Em relação ao desfasamento entre os valores obtidos pelos dois métodos, a frequência calculada regista um erro máximo de 26 %, relativamente à registada pelo sonómetro. Isto vai de encontro aos resultados simulados numericamente [36], onde, mesmo apesar do cálculo da frequência de escape ser tratado de forma diferente, verifica-se um erro máximo de 35 % por defeito.

Quanto à evolução da frequência experimental para os diferentes caudais mássicos definidos testemunha-se que, uma mistura mais pobre em combustível, apresenta uma frequência ligeiramente inferior, no entanto, isto não significa que uma mistura rica irá provocar um aumento substancial do número de ciclos no tempo. Na prática, o que traduz a curva experimental da Figura 5.18 é que, para caudais de propano mais elevados, a frequência de operação mantém-se constante em 125 Hz. A explicação para haver um teto máximo para o número de oscilações por segundo, deve-se ao facto de a frequência de funcionamento de um motor pulsojato ser maioritariamente ditada pela geometria do mesmo, tal como foi concluído no estudo prático de McCalley [40].

Relativamente aos valores da frequência registados durante os ensaios estáticos, estes encontram-se bastante próximos dos obtidos por Meholic [28], onde a frequência foi medida através da variação da pressão interna no tempo. Nesta investigação, Meholic testou vários comprimentos do ducto de escape e verificou que, quando o seu pulsojato apresentava um comprimento de 1,40 m, valor este muito próximo do atual modelo testado, a frequência operacional variou entre 111,1 e 125 Hz, ou seja, rigorosamente os mesmos valores experimentais registados na Figura 5.18.

5.4.6 Nível de Pressão Sonora

A pressão sonora do pulsojato foi capturada através do sonómetro SW-524 instalado 1,20 m a jusante da tubeira de escape, orientado 40° com o jato propulsivo. Na Figura 5.19, representa-se a intensidade sonora máxima detetada para cada caudal de propano injetado.

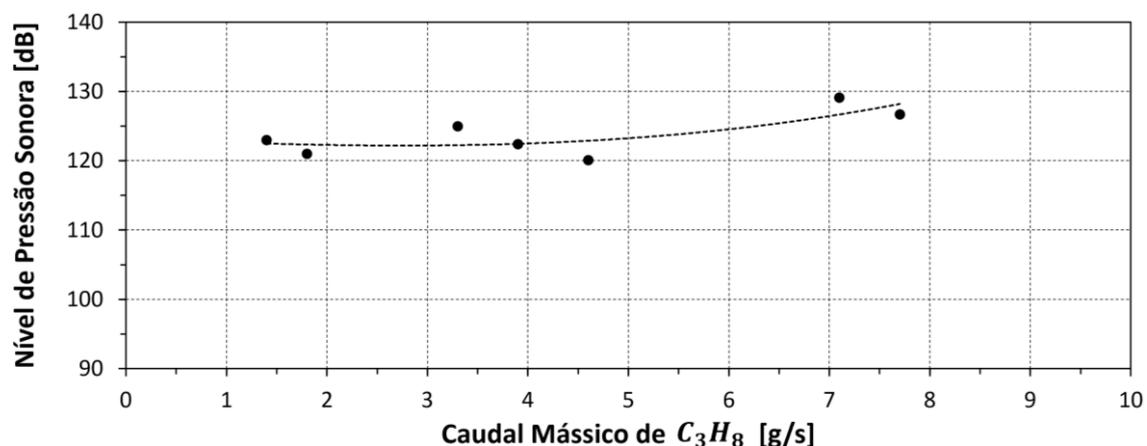


Figura 5.19- Nível de Pressão Sonora.

Os dados da Figura 5.19 parecem não ser muito conclusivos relativamente à variação da pressão sonora com os diferentes caudais de propano testados. No entanto, o gráfico ajuda a entender que os dados possam estar contaminados por um fator não monitorado durante os ensaios, isto é, a pressão de injeção. Esta afirmação é fundamentada pelo facto de, no ensaio onde foram testados os caudais de 3,3, 3,9 e 4,6 g/s, a pressão do combustível para cada um destes foi cada vez menor, traduzindo-se numa queda de 125 para 120 dB.

Ainda assim, é perceptível que, para os cinco caudais mássicos menos abundantes, as medições do nível de pressão sonora têm uma média de 122 dB, face aos 128 dB dos dois últimos pontos. Este acontecimento indicia que, o nível de pressão sonora é afetado, não só pela pressão de injeção, como também pelo caudal energético que alimenta o pulsojato.

Capítulo 6

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

O desenvolvimento deste trabalho permitiu inferir algumas conclusões relativamente aos pulsojatos não valvulados e sua operação. Desta forma, o último capítulo da presente dissertação, irá revelar quais as constatações resultantes dos ensaios estáticos e, além disso, fazer uma breve analogia com o estudo numérico realizado para este mesmo propulsor [36]. Por fim, expor-se-ão sugestões de planos de trabalho que possam vir a ser desenvolvidos futuramente.

6.1 Conclusões

No sentido de dar continuidade ao estudo numérico do dimensionamento de um motor pulsojato sem válvulas, uma investigação experimental foi desenvolvida a fim de proceder à construção física do motor simulado numericamente, bem como a realização de ensaios estáticos capazes de caracterizar o seu desempenho.

Grande parte dos objetivos que haviam sido perspetivados para este trabalho foram alcançados, nomeadamente o funcionamento em regime estável e autossustentável do propulsor, bem como a recolha de dados relativos à sua operação, possibilitando a comparação com aqueles que haviam sido previstos pela simulação CFD. No entanto, algumas limitações experimentais levaram a que nem todos os objetivos iniciais fossem cumpridos, como é o caso de apenas ter sido testado um tipo combustível, contrariamente à investigação numérica onde foi simulada a operação com propano e metano. Além disso, faltou monitorar a pressão interna da câmara de combustão, de forma a entender como esta varia ao longo de um ciclo.

Uma das principais dificuldades que existiu na realização deste projeto, foi conseguir atingir a combustão autossustentável com a geometria modelada numericamente, ou seja, o motor não funcionava sem o suplemento de ar comprimido. Para tal, seguiram-se diversas e exaustivas tentativas que incluíram a variação das dimensões do motor, bem como modificações dos caudais de ar e combustível. Em resultado, verificou-se a necessidade de aumentar 18,5 cm o ducto de escape e instalar sobre este um divergente, até que, finalmente, o funcionamento autossustentável foi conquistado. Em adição, o ducto da admissão sofreu um acréscimo de 4,7 cm em relação ao projeto, de forma a permitir a operação do pulsojato em diferentes regimes de acelerador.

Outra limitação sentida, foi garantir a consistência dos ensaios estáticos para a mesma porção de acelerador definida, isto porque a pressão de injeção do combustível diminui à medida que

também decresce o conteúdo de gás no interior do reservatório. Por este motivo, houve a necessidade de repetir vários testes, a fim de reunir os resultados menos contaminados por esta variável.

Os ensaios estáticos realizados permitiram perceber que o funcionamento dos motores pulsojato não valvulados é bastante suscetível a determinadas condições. A primeira é a geometria do motor, em que tem que existir uma afinação exata entre o comprimento do ducto de escape e admissão, para que ocorra o sincronismo das ondas libertas por cada um destes componentes. A Segunda é que a instalação do divergente na extremidade da tubeira de escape é imprescindível ao funcionamento autossustentável. Através deste elemento, foi possível aumentar o diferencial de pressão e, com isso, promover o vácuo parcial criado no interior da câmara de combustão. Por último, em semelhança ao que já havia sido concluído pelo estudo numérico, a posição da injeção do combustível é extremamente importante, ao ponto de determinar a eficiência da queima de combustível. Durante os ensaios estáticos foi averiguado que, em relação a uma injeção com grande avanço sobre a admissão, um ponto de entrega de combustível próximo da entrada deste ducto, permite aumentar cerca de duas vezes mais a tração produzida.

Relativamente à frequência operacional, os ensaios experimentais vieram comprovar a teoria de que a frequência dos motores pulsojato é limitada pela geometria dos mesmos, tal como defendido por McCalley [40]. Em particular, a frequência máxima registada para o pulsojato alvo desta investigação foi de 125 Hz. No que diz respeito à teoria que prevê a frequência de operação do motor, mencionada na secção 3.8, esta demonstra subestimar o número de ciclos realizados por segundo, tal como previsto pelo estudo CFD. O erro máximo testemunhado entre a frequência medida através do sonómetro e a calculada, foi de 26 %. Uma vez que existiu a necessidade de aumentar o comprimento do motor face ao simulado numericamente, a frequência máxima obtida experimentalmente foi de 125 Hz, face aos 160 Hz obtidos pelo trabalho numérico. Isto vai de encontro ao princípio fundamentado por Geng et al. [19], que defende que pulsojatos de maiores dimensões apresentam valores de frequência menores.

Uma constatação interessante que os resultados experimentais parecem ter transmitido é que, existe uma relação direta entre a temperatura da câmara de combustão e a tração proporcionada pelo pulsojato sem válvulas. Assim, tal como demonstrado no gráfico da Figura 5.15, um aumento da temperatura na câmara traduziu, de igual forma, um incremento na força de tração produzida, e vice-versa.

A tração estática máxima produzida pelo pulsojato sem válvulas foi de 26,14 N, ou seja, muito próximo da força de tração máxima obtida nas simulações numéricas, 24,8 N. No entanto, quando comparamos os caudais mássicos de combustível, verifica-se que os caudais definidos nas simulações numéricas são bastante mais elevados do que os praticados nos ensaios experimentais. Para se ter uma ideia, para gerar uma força de tração próxima de 14 N, o estudo

CFD exigiu um caudal de 40 g/s de propano, enquanto na prática apenas foram necessários 4,0 g/s, ou seja, cerca de dez vezes menos caudal. Uma possível explicação para este acontecimento, é o facto de o estudo CFD apenas ter sido simulado em 2D e, talvez por isso, se verifica esta ineficiência relativamente ao pulsojato simulado. Em relação ao objetivo imposto do pulsojato desenvolver uma tração igual a 6 kgf, tanto o estudo numérico como a investigação experimental, se mostraram incapazes de cumprir este feito.

Relativamente ao material escolhido para construir os diversos componentes do pulsojato verificou-se que, a chapa em aço galvanizado de 1,5 mm de espessura utilizada na câmara de combustão, revelou ser insuficiente para suportar as elevadas temperaturas características nesta zona. Como representado na Figura 5.10, a temperatura interna da câmara chegou mesmo a ultrapassar os 1600 K, provocando que as paredes atingissem, por diversas vezes, o estado de incandescência. Em consequência, as paredes da câmara de combustão começaram a escamar e a perda de espessura durante os ensaios foi sendo cada vez mais agressiva. Assim sendo, a fim de preservar a integridade da câmara de combustão, deveria ter sido escolhido não só um aço de maior espessura, como também deveria ter sido usado aço inoxidável na vez de aço galvanizado, de forma a evitar a corrosão das paredes.

É importante salientar que, mesmo com dois reservatórios de propano a serem utilizados em simultâneo e com uma condição de acelerador totalmente aberto, a combustão autossustentável no interior do pulsojato permaneceu ativa. Isto indicia que, se mais caudal de combustível fosse utilizado para alimentar o pulsojato, este poderia vir a desenvolver uma maior força de tração e, quem sabe, aproximar-se dos 46,6 N previstos pela teoria mencionada na secção 3.7.

6.2 Trabalhos Futuros

Tal como já foi referido na presente dissertação, a tração gerada pelo pulsojato sem válvulas ficou um pouco aquém do espectável. Nesse sentido, grande parte das sugestões de trabalhos futuros remeter-se-ão numa perspetiva de melhorar o desempenho e eficiência do propulsor construído.

No ponto de vista de eliminar o problema da perda de pressão associado aos combustíveis GPL engarrafados, devem ser testados combustíveis líquidos como forma de alimentar o pulsojato, nomeadamente gasolina. Assim, a exigência de ter que se usar uma bomba para injetar o combustível dentro do motor, permitirá manter a mesma pressão de injeção ao longo dos ensaios.

Para um melhor entendimento de como varia a pressão interna do pulsojato durante um ciclo, recomenda-se a utilização de um sensor transdutor de pressão no interior da câmara de combustão. Em adição, a evolução da pressão ao longo do tempo permitirá determinar a

frequência operacional do pulsojato e, assim, confrontar com os valores previstos pelo sonómetro.

Dado que o pulsojato construído sofreu um desvio nas dimensões face ao modelo dimensionado numericamente, deve ser feito um novo estudo CFD com a nova geometria e, sobretudo, aplicar uma simulação tridimensional.

No sentido de amplificar a tração produzida pelo pulsojato, devem ser instalados aumentadores de tração sobre as extremidades do propulsor. Através do espaço livre existente entre o ducto e o corpo aumentador de tração, consegue-se avolumar a quantidade de ar expandido e, com isto, gerar mais tração.

Uma vez que foram realizados ensaios com os redutores totalmente abertos e, mesmo assim, verificou-se que a combustão autossustentável permaneceu ativa, sugere-se a utilização de redutores com um débito de caudal mássico mais elevado, a fim de aumentar a quantidade de combustível injetado e, com isto, espera-se aumentar a tração desenvolvida pelo pulsojato sem válvulas.

Bibliografia

- [1] Narayan, "Pulsejet Technology," em *38th Engine Systems Symposium*, 2013.
- [2] A. F. El-Sayed, "Pulsejet, Ramjet, and Scramjet Engines," em *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion*, Londres, Springer, 2016, pp. 315-330.
- [3] S. J. Zaloga e J. Laurier, *V-1 Flying Bomb 1942-52: Hitler's Infamous 'Doodlebug'*, OSPREY PUBLISHING, 2005.
- [4] "The WWII V-1 Doodle Bug Flying Bomb," [Em linha]. Disponível em: www.fiddlersgreen.net/models/Aircraft/V1. [Acedido em 19 março 2019].
- [5] "Yokosuka MXY7 Ohka [Oka] Japanese Flying Bomb," [Em linha]. Disponível em: www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/Yokosuka-Ohka. [Acedido em 19 março 2019].
- [6] B. Ogorelec, "Valveless Pulsejet Engines 1.5," [Em linha]. Disponível em: www.academia.edu. [Acedido em 13 março 2019].
- [7] B. Simpson, "The Valveless Pulse Jet," 13 fevereiro 2002. [Em linha]. Disponível em: <https://aardvark.co.nz/pjet/valveless.htm>. [Acedido em 13 março 2019].
- [8] W. POLT, "New thrust-new era?," BOEING FRONTIERS, dezembro 2003. [Em linha]. Disponível em: www.boeing.com/news/frontiers/. [Acedido em 19 março 2019].
- [9] D. STEPHENSON, "MOBILITY MATTERS," BOEING FRONTIERS, fevereiro 2003. [Em linha]. Disponível em: www.boeing.com/news/frontiers/. [Acedido em 19 março 2019].
- [10] Google patents, [Em linha]. Disponível em: patents.google.com. [Acedido em 19 março 2019].
- [11] "AF Manual 355-10 (1955) / XH-26 Jet Jeep & H-6 Hoverfly II," 25 janeiro 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/88160313@N03/22771432454>. [Acedido em 19 março 2019].
- [12] "Blohm and Voss Bv P.213 (Miniatur-Jager)," [Em linha]. Disponível em: https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=1734. [Acedido em 19 março 2019].

- [13] N. Patil, “Kawanishi Baika,” 22 maio 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://alchetron.com/Kawanishi-Baika>. [Acedido em 19 março 2019].
- [14] “Junkers Ju EF 126,” [Em linha]. Disponível em: https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=2004. [Acedido em 19 março 2019].
- [15] M. Trancossi, O. Mohammedalamin, J. C. Pascoa e F. Rodrigues, “Thermodynamic Analysis and Preliminary Design of the Cooling System of a Pulsejet for Aeronautic Propulsion,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY*, pp. 528-534, 2016.
- [16] A. Kudesia e A. M. Bisen, “FUTURE ASPECTS OF VALVELESS PULSE JET ENGINE,” *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 3, n° 1, pp. 184-190, 2015.
- [17] D. E. Paxson, J. Wilson e K. T. Dougherty, “UNSTEADY EJECTOR PERFORMANCE: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION USING A PULSEJET DRIVER,” em *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, 2002
- [18] C. Wenxiang, W. Xiaosong, W. Tao e S. Bo, “Numerical Investigation of components length of china-type valveless pulsejet,” *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, 11-13 dezembro 2009.
- [19] T. Geng, M. A. Schoen, A. V. Kuznetsov e W. L. Roberts, “Combined Numerical and Experimental Investigation of a 15-cm Valveless Pulsejet,” *Flow Turbulence Combust*, n° 78, pp. 17-33, 2007.
- [20] T. Geng, F. Zheng, A. P. Kiker, A. V. Kuznetsov e W. L. Roberts, “Experimental and numerical investigation of an 8-cm valveless pulsejet,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, n° 31, pp. 641-647, 2007.
- [21] T. NAKANO, M. ZEUTZIUS, H. MIYANISHI, T. SETOGUCHI e K. KANEKO, “Studies on Pulse Jet Engine by Wind Tunnel Testing,” *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 7, n° 2, pp. 79-85, 2001.
- [22] F. Zheng, R. L. Ordon, T. D. Scharton, A. V. Kuznetsov e W. L. Roberts, “A New Acoustic Model for Valveless Pulsejets and Its Application to Optimization Thrust,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, n° 4, 2008.

- [23] Z. Tao, Z. Yong e C. Wenxiang, “Numerical investigation of typical valveless pulse combustor working process,” *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 287-291, 2017.
- [24] F. Zheng, T. Geng, A. Kuznetsov e W. L. Roberts, “Numerical Study of the effect of Inlet Size and Interior Obstructions on the Performance of Valveless Pulsejets,” em *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cincinnati, USA, 2007.
- [25] D. R. Greatrix, *Powered Flight-The Engineering of Aerospace Propulsion*, Canada: Springer, 2012.
- [26] G. Diedrich, *The Aero-Resonator Power Plant of the V-1 Flying Bomb*, New Jersey: Air Documents Division, 1948.
- [27] A. F. El-Sayed, *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*, Florida: CRC Press, 2017.
- [28] G. V. Meholic, “The Evolution and Testing of an Aerovalve Pulsejet Engine,” Dissertação de Mestrado, Daytona Beach-Florida, 1995.
- [29] J. Kentfield, “The potential of valveless pulsejets for small UAV propulsion applications,” em *34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.*, Cleveland,OH,U.S.A..
- [30] B. Simpson, *The enthusiast guide to pulsejet engines*, Nova Zelândia, 2005.
- [31] M. L. Coleman, *OVERVIEW OF PULSE DETONATION PROPULSION TECHNOLOGY*, Columbia: CHEMICAL PROPULSION INFORMATION AGENCY, 2001.
- [32] R. M. Lockwood, E. R. Sargent e J. E. Leckett, “THRUST AUGMENTED INTERMITTENT JET LIFT-PROPULSION SYSTEM,” Bureau of Naval Weapons, Washington, 1960.
- [33] S. Kumar, S. S. Prasad e V. Krishna, “Design of Pulse Jet Engine for UAV,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. III, nº 9, pp. 670-675, 2014.
- [34] V. Ganesan, “THE LENOIR CYCLE,” em *Internal Combustion Engines*, Nova Deli, McGraw-Hill Education, 2007, pp. 93-94.
- [35] R. Rajput, “Air Standard Cycles,” em *A Textbook of Internal Combustion Engines*, Nova Deli, Laxmi Publications, 2005, pp. 85-161.

- [36] A. S. M. Melo, "Pulsejet Engine Performance Estimation," Dissertação de mestrado, Dept. Ciências Aeroespaciais, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2019.
- [37] R. L. Ordon, "EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO THE OPERATIONAL PARAMETERS OF A 50 CENTIMETER CLASS PULSEJET ENGINE," Dissertação de mestrado, Dept. Engenharia Mecânica, Universidade da Carolina do Norte, Raleigh, 2006.
- [38] C. Tharratt, "The Propulsive Duct," Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 37, nº 11, pp. 327-337, 1965.
- [39] S. R. Chaurasia, R. Gupta e R. Sarviya, "Performance Analysis of a Pulsejet Engine," International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) , vol. 3, nº 4, pp. 605-609 , 2013.
- [40] C. T. McCalley, "EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF LIQUID FUELED PULSEJET ENGINES," Dissertação de Mestrado, Dept. Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Carolina do Norte, Raleigh, 2006.

Apêndice A

A Código Arduino

```
#include "max6675.h"
#include "HX711.h"
#include <Adafruit_MAX31856.h>

//Ligacoes

// Termopar tipo K
int ktcSO_1 = 50;
int ktcCS_1 = 48;
int ktcCLK_1 = 52;

int ktcSO_2 = 51;
int ktcCS_2 = 49;
int ktcCLK_2 = 53;

// Termopar tipo S (industrial)
// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31856 maxthermo = Adafruit_MAX31856(36, 39, 37, 38);

// Celula de Carga

const int LOADCELL_DOUT_PIN_1 = 3;
const int LOADCELL_SCK_PIN_1 = 2;
const int LOADCELL_DOUT_PIN_2 = 5;
const int LOADCELL_SCK_PIN_2 = 4;

unsigned long time;

MAX6675 ktc_1(ktcCLK_1, ktcCS_1, ktcSO_1);
MAX6675 ktc_2(ktcCLK_2, ktcCS_2, ktcSO_2);

HX711 scale_1;
HX711 scale_2;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  scale_1.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_1, LOADCELL_SCK_PIN_1);
  scale_2.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_2, LOADCELL_SCK_PIN_2);
  maxthermo.begin();
}

////////////////////////////////////Filtro de KALMAN////////////////////////////////////

float q=0.000001;
float p=1.0;
float r=0.00001;

int x_k_1[8]={25,25,93,2000,0,9000,40,80};
int x_k[8];
```

```

////////////////////////////////ciclo////////////////////////////////
void loop() {
  // basic readout test

  //Serial.print("Sensor_1 = "); (TERMOPAR_TIPOK_1)
  float termo_k_1=ktc_1.readCelsius();
  //Serial.print(termo_k_1);
  //Serial.print(',');

  //Serial.print("sensor_2= "); (TERMOPAR_TIPOK_2)
  float termo_k_2=ktc_2.readCelsius();
  //Serial.print(termo_k_2);
  //Serial.print(',');

  // read the input on analog pin 2:
  int sensorValue = analogRead(A1);
  int tempValue = analogRead(A5);

  float pressure_kPa = map(sensorValue, 363, 692, 40.971, 80.967);
  // float pressure_Pa=(0.1217*sensorValue-3.1613)*1000;
  int temp_map = map(tempValue, 5, 803, 26.0, 0);

  // print out the value you read:
  // Serial.println(sensorValue);
  //Serial.print(pressure_kPa);
  //Serial.print(',');
  //Serial.print(temp_map);
  //Serial.print(',');

  // Serial.print(pressure_kPa);

  #####tracao

  long reading_1 = scale_1.read();
  // Serial.print("HX711 reading, gramas: ");
  //Serial.println(reading_1);
  //Serial.println(reading_2);
  int massa_1 = map(reading_1, -118054,-336130 ,0 , 500);

  #####Caudal C3H8

  float tempo_caudal=0.36; //segundos

  long reading_2_1 = scale_2.read();
  // int massa_2_1 = map(reading_2_1, 930044,1151553 ,1030 , 2040);
  int massa_2_1=0.0046*reading_2_1-3210.7;
  delay(0.01);
  long reading_2_2 = scale_2.read();
  // int massa_2_2 = map(reading_2_2, 930044,1151553 ,1030 , 2040);
  int massa_2_2=0.0046*reading_2_2-3210.7;
  int caudal=(massa_2_1-massa_2_2)/tempo_caudal;
  //Serial.print(massa_1);
  //Serial.print(',');
  //Serial.print(massa_2);

  //Serial.print(',');
  float termo_s=maxthermo.readThermocoupleTemperature();
  //Serial.print(termo_s);

  //Amplificador de Microfone

  // read the input on analog pin 2:
  int mic = analogRead(A2);
  int db;
  db =20*log10(mic);
  //Serial.print(',');
  //Serial.print(db);

```

```

//# Serial.print('\n');

time=millis();

////////////////////////////////////Filtro de Kalman////////////////////////////////////

// Medicoes NÃO filtradas

int vetor_z[8]={termo_k_1,termo_k_2,pressure_kPa,massa_1,caudal,massa_2_2,termo_s,db};

for (byte i=0;i<8;i=i+1) {
  Serial.print(vetor_z[i]);
  Serial.print(',');
}

// Serial.print('\n');

// Medicoes filtradas

for (byte i=0;i<8;i=i+1) {
  x_k[i]=x_k_1[i];
  p=p+q;
  float k=p/(p+r);
  x_k_1[i]=x_k[i]+k*(vetor_z[i]-x_k[i]);
  p=(1-k)*p;

  Serial.print(x_k[i]);
  Serial.print(',');

}

// IMPRIMIR CAUDAL
//Serial.print(vetor_z[4]);
//Serial.print(',');
//Serial.print(x_k[4]);

////////////////////////////////////
Serial.print(time/1000.0);

  Serial.print('\n');

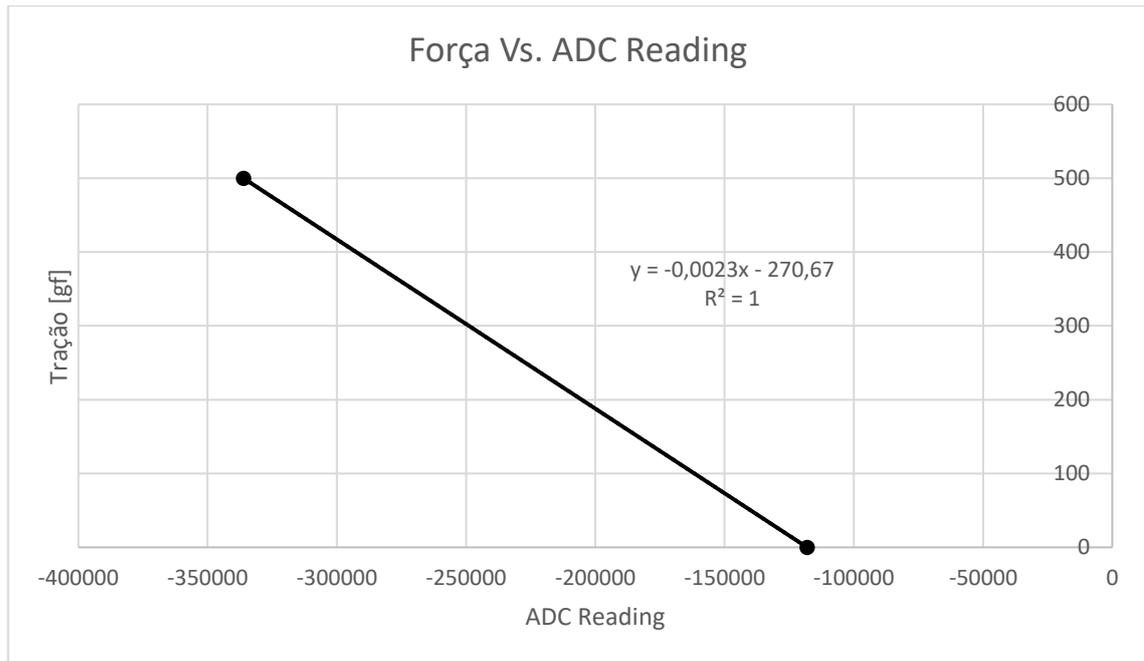
  delay(5);
}

```

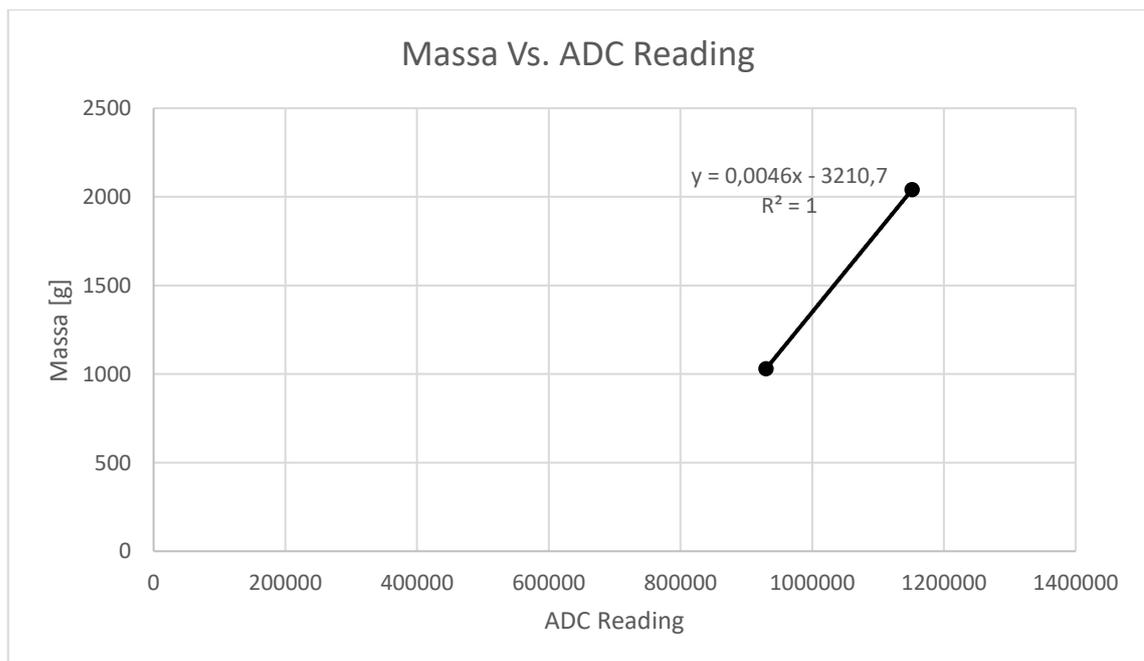

Apêndice B

B Retas de Calibração dos Sensores

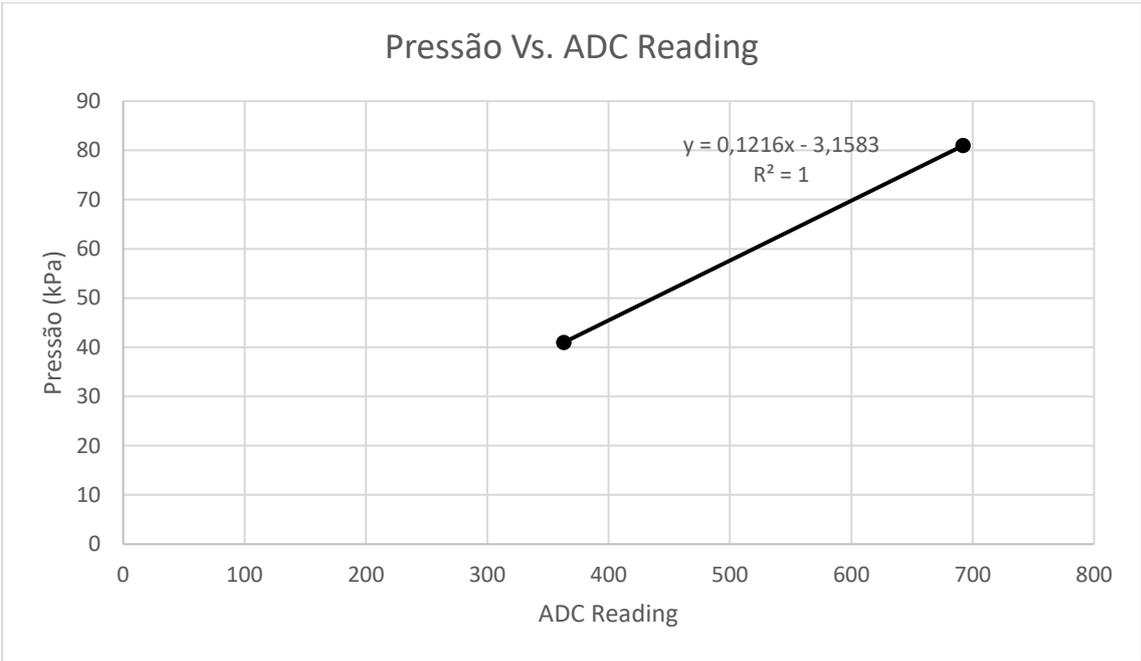
B.1 Célula de Carga para Medição da Tração



B.2 Célula de Carga para Medição do Caudal Mássico de C_3H_8



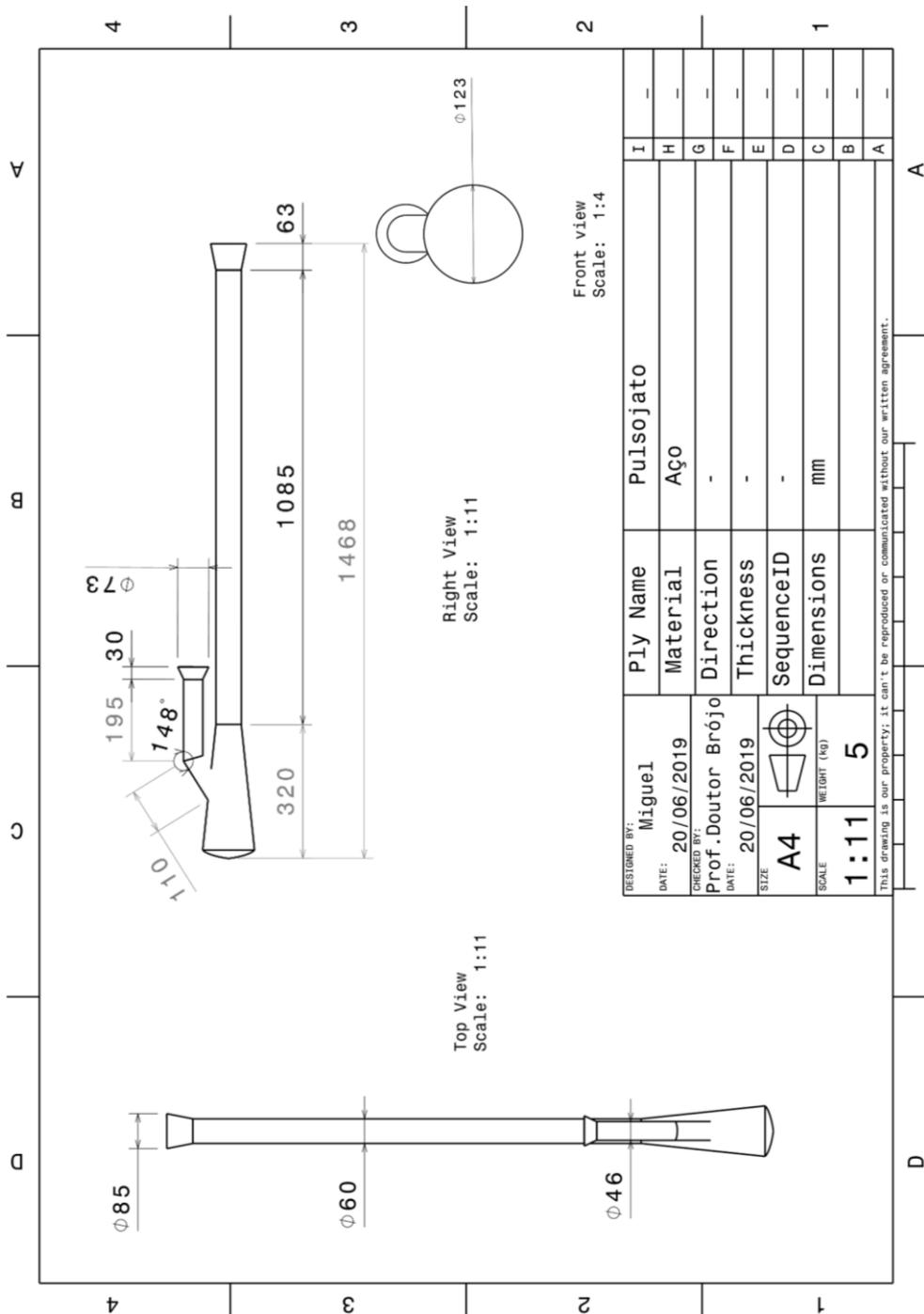
B.3 Sensor de Pressão Absoluta-MAP



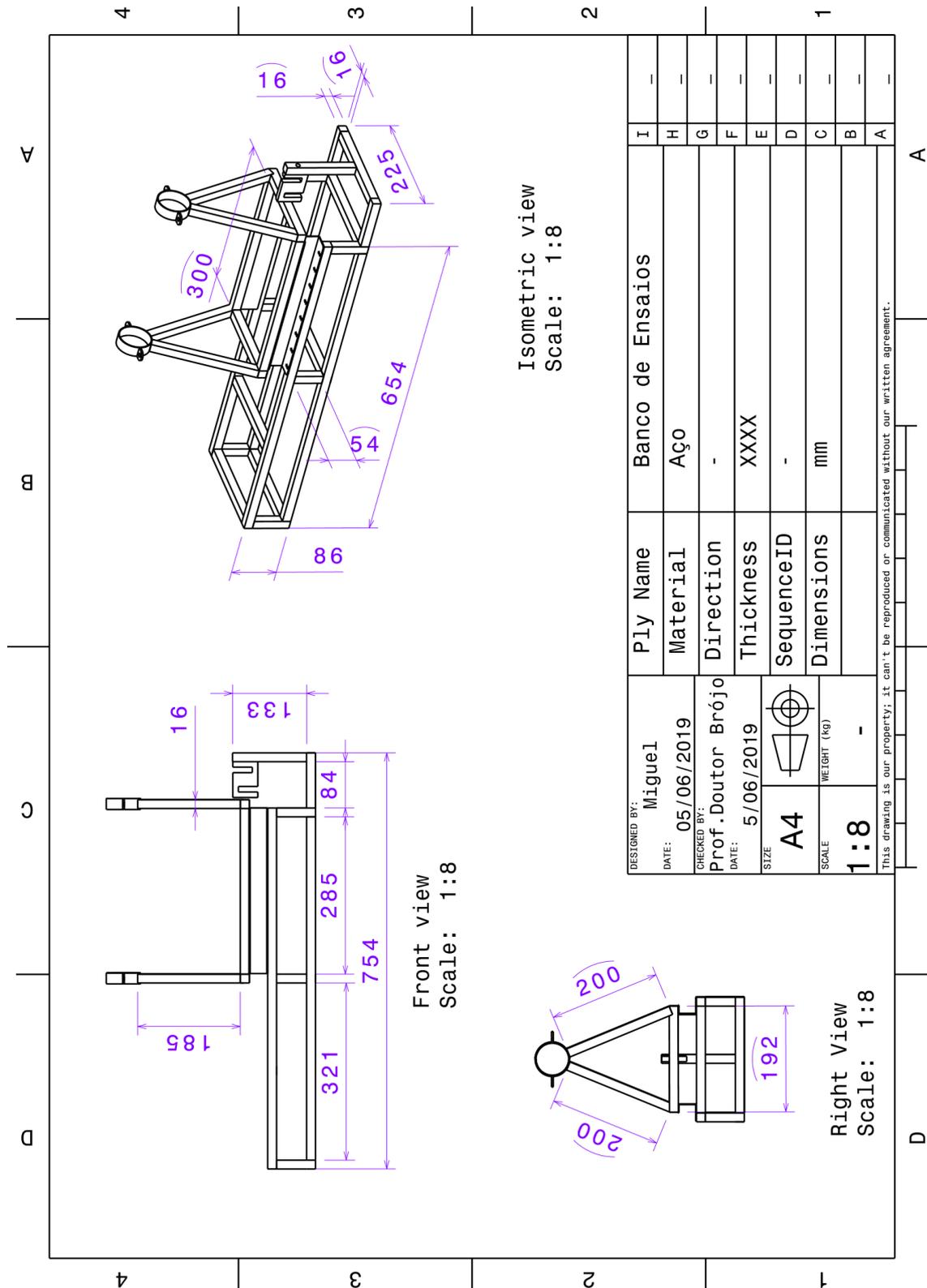
Apêndice C

C Desenhos Técnicos

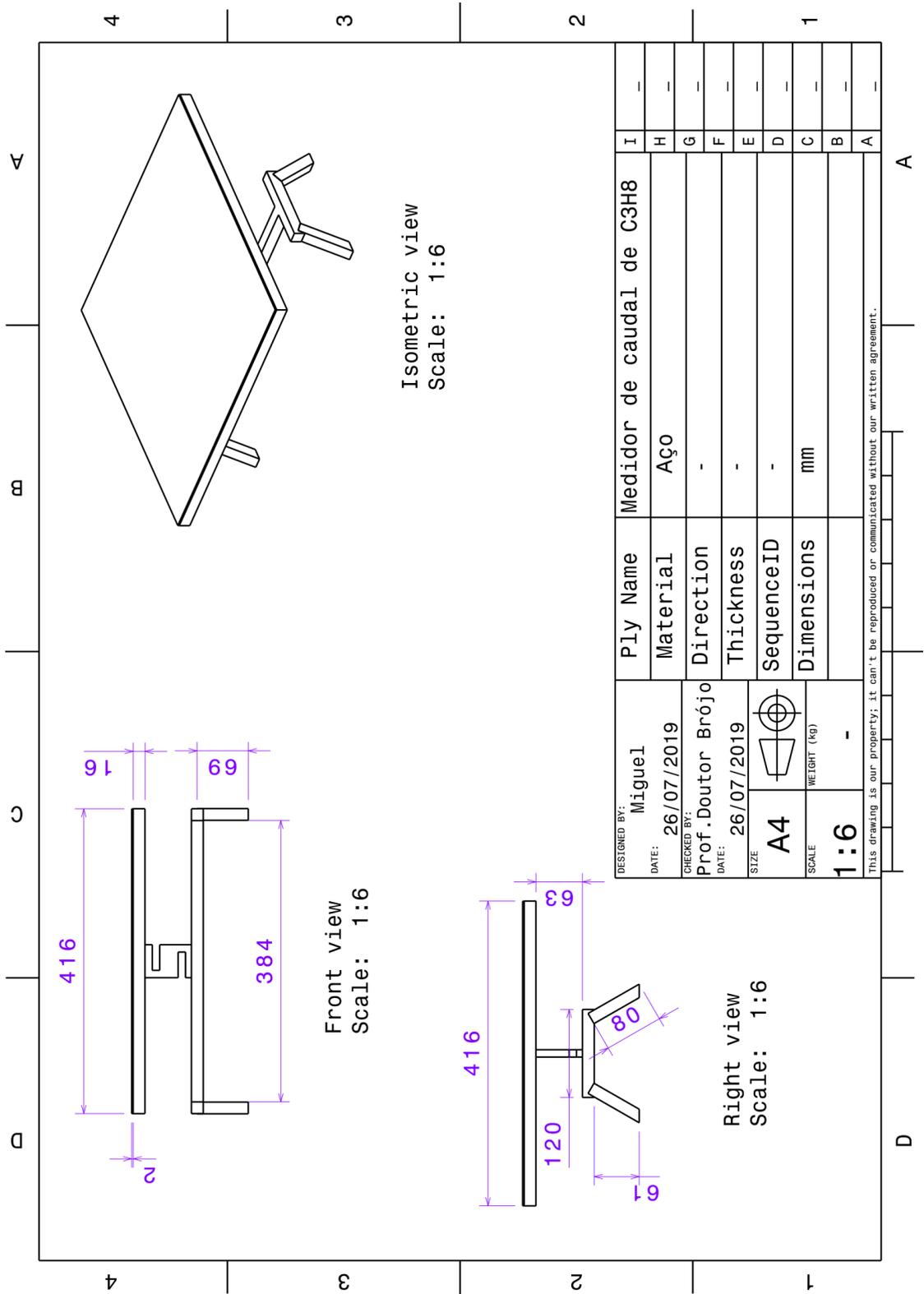
C.1 Pulsojato



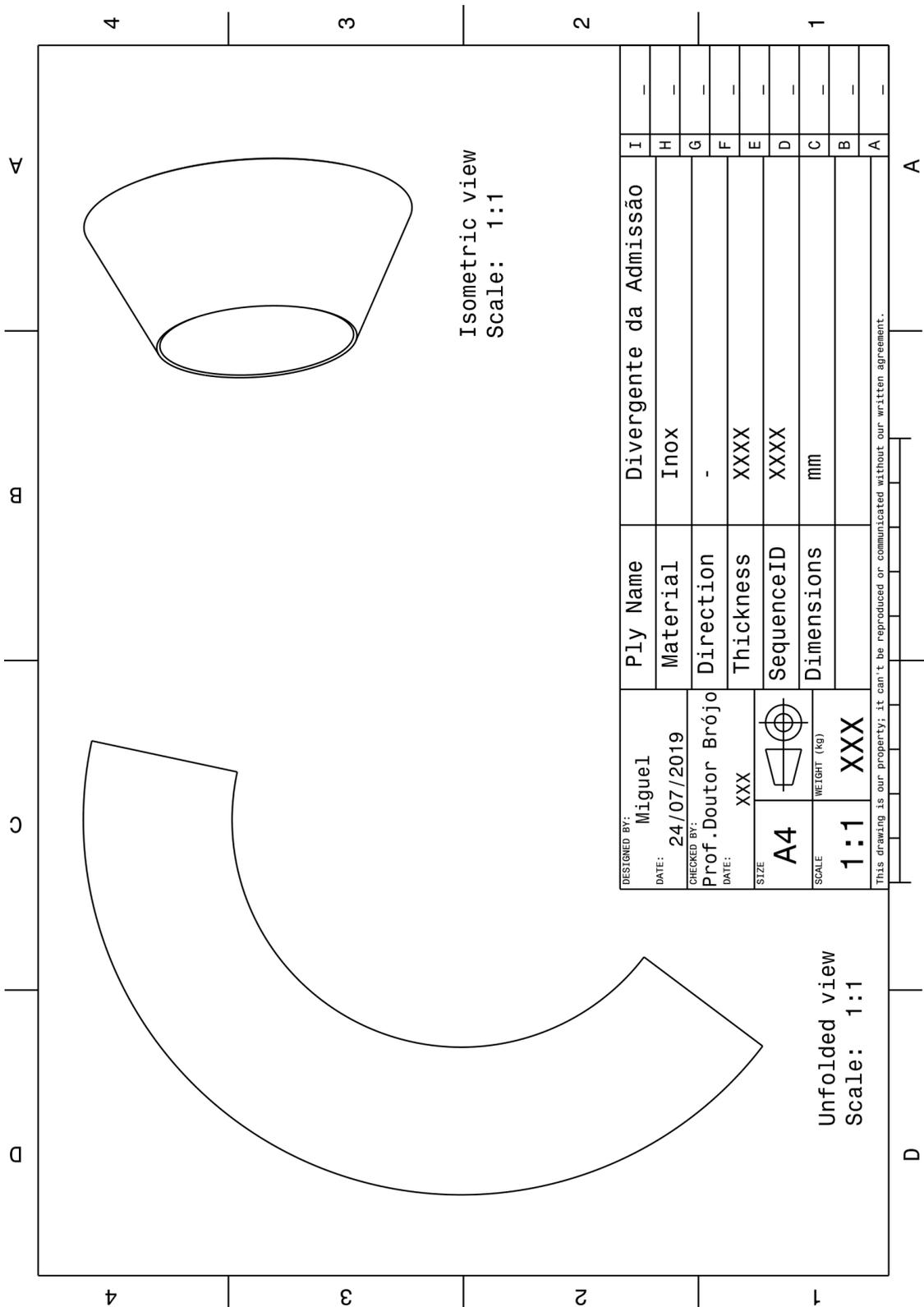
C.2 Banco de Ensaio



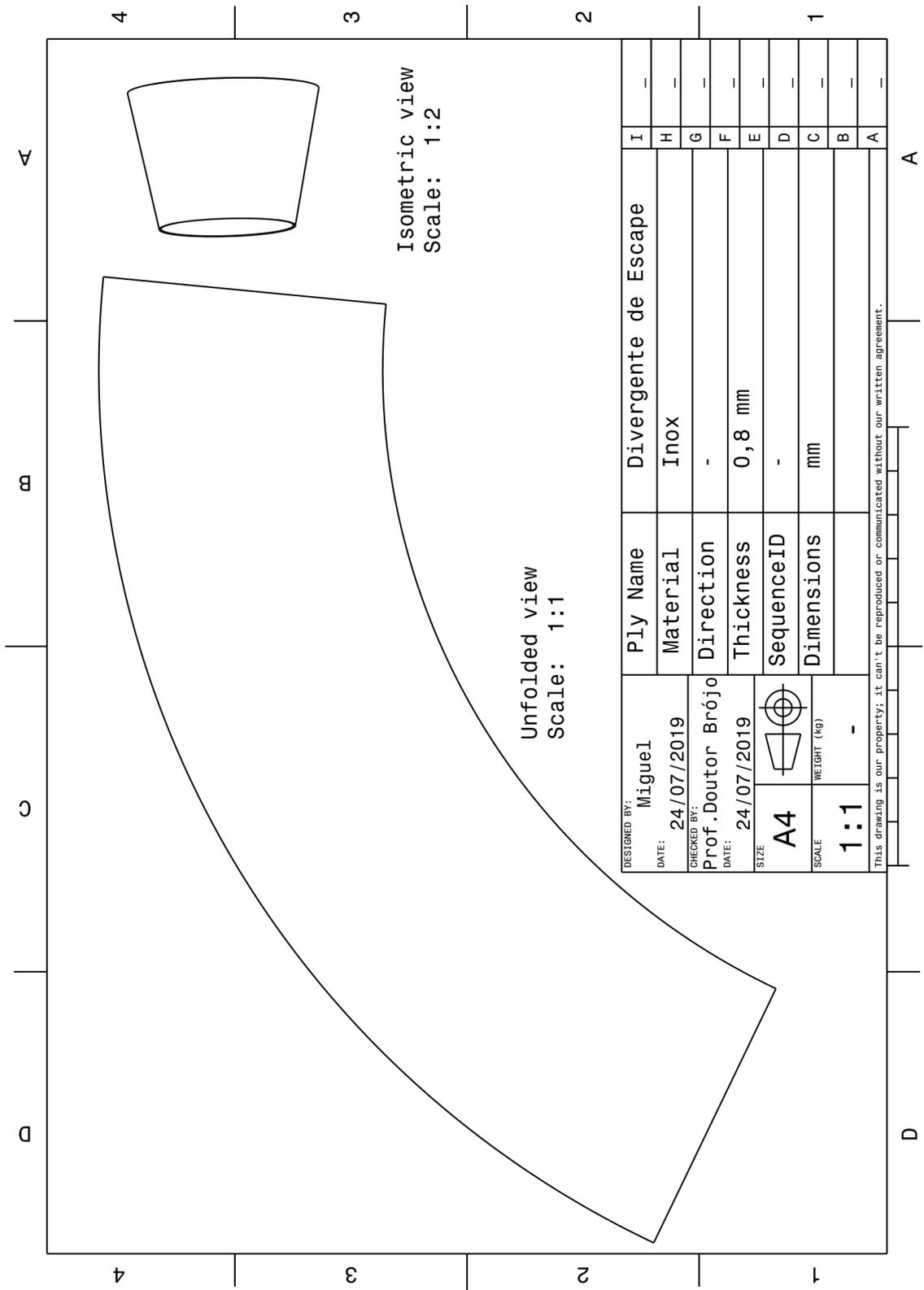
C.3 Plataforma para Medição do Caudal de Propano



C.4 Divergente do Ducto de Admissão



C.5 Divergente do Ducto de Escape



Apêndice D

D Aparato Eletrônico

