

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
OCTÁVIO LUIZ FERRARI DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO HIDRÁULICA
EM AERONAVE

Taubaté - SP

2018

OCTÁVIO LUIZ FERRARI DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO HIDRÁULICA
EM AERONAVE**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. (Me.) Luiz Ricardo Hercos

Coorientador: Fabio José Santos de Oliveira

Taubaté - SP

2018

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237d

Santos, Octávio Luiz Ferrari dos
Dimensionamento de tubulação hidráulica em aeronave.
/ Octávio Luiz Ferrari dos Santos. - 2018.

91f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2018

Orientação: Prof. Me Luiz Ricardo Pietro Hercos,
Coorientação: Prof. Esp. Fábio José Santos de Oliveira,
Engenheiro da Empresa Brasileira de Aeronáutica..

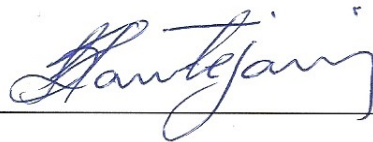
1. Aeronave. 2. Sistema hidráulico. 3. Tubulação
hidráulica. I. Título.

OCTÁVIO LUIZ FERRARI DOS SANTOS

DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO HIDRÁULICA EM AERONAVE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO
EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

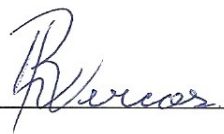
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. (Msc) FÁBIO HENRIQUE FONSECA SANTEJANI

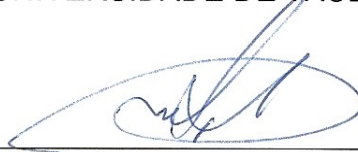
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. (Me.) LUIZ RICARDO HERCOS

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. (Me.) PEDRO MARCELO ALVES FERREIRA PINTO

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

(21 de Junho, 2018)

Dedico este trabalho aos meus pais Doralice Ferrari e Odair Pereira, aos meus irmãos, Gustavo Henrique Ferrari e Felipe Augusto Ferrari.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados.

Aos meus orientadores, *Prof. (Me.) Luiz Ricardo Hercos e Fabio José Santos de Oliveira* por todo o incentivo e motivação na orientação deste trabalho.

Aos meus pais *Doralice Ferrari e Odair Pereira*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos Professores Me. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto e Msc Fábio Henrique Fonseca Santejani por aceitarem compor a banca examinadora.

“A persistência é o menor caminho do êxito”

(CHARLES CHAPLIN)

RESUMO

No mercado da aeronáutica existe uma grande concorrência entre empresas muito experientes neste setor. Por se tratar de um produto de custo elevado, os clientes são exigentes e definem a sua compra baseando-se em detalhes. Para que uma companhia aérea faça a aquisição de uma nova aeronave para sua frota, são levados em consideração diversos critérios, dentre os mais relevantes, o consumo de combustível. De acordo com os dados do setor aeronáutico, o combustível hoje corresponde por mais da metade dos custos operacionais de um avião comercial típico. Por este motivo, é essencial que uma aeronave seja econômica para ter sua aceitação e sucesso no mercado. Além de motores modernos e de baixo consumo, a aeronave precisa ser leve e eficiente. Este estudo apresenta a melhor configuração possível de tubulação hidráulica, atendendo a requisitos e restrições preexistentes no projeto, determinando o conjunto de menor peso para o sistema hidráulico de uma aeronave comercial.

Palavras-chave: Aeronave. Sistema hidráulico. Tubulação hidráulica.

ABSTRACT

In the aeronautics market there is a lot of competition between very experienced companies in this sector. Because it is a high cost product, the customers are demanding and define their purchase based on details. For an airline to purchase a new aircraft for its fleet, several criteria are taken into account, among the most relevant, the fuel consumption. According to aeronautical industry data, fuel nowadays corresponds for more than half of the operating costs of a typical commercial airliner. For this reason, it is essential that an aircraft be economical to have its acceptance and success in the market. In addition to modern and low-consumption engines, the aircraft needs to be lightweight and efficient. This study presents the best possible configuration of hydraulic tubing, meeting pre-existing requirements and constraints in the project, determining the lowest weight set for the hydraulic system of a commercial aircraft.

KEYWORDS: Aircraft, Hydraulic System, Hydraulic pipe

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – BOMBARDIER REGIONAL JET 700/900 HYDRAULIC SYSTEM SCHEMATIC	22
FIGURA 2 – MOVIMENTOS GERADOS PELO CONTROLE DE VOO PRIMÁRIO	24
FIGURA 3 – AIR FRANCE CARGO BOEING 747-400F – CONTROLES DE VOO	25
FIGURA 4 – PRINCÍPIO DE PASCAL.....	26
FIGURA 5 – PRINCÍPIO DE BERNOULLI.....	27
FIGURA 6 – ESCOAMENTO LAMINAR	29
FIGURA 7 – ESCOAMENTO TURBULENTO.....	29
FIGURA 8 – CURVAS COM $R/D > 2$	33
FIGURA 9 – CURVA DE RENDIMENTO DA BOMBA	38
FIGURA 10 – RESERVATÓRIO TIPO BOOTSTRAP.....	40
FIGURA 11 – ARQUITETURA DO SISTEMA HIDRÁULICO	41
FIGURA 12 – FASES DE VOO.....	49
FIGURA 13 – GRÁFICO DE DEMANDA POR FASE DE VOO, CONFIGURAÇÃO 1	66
FIGURA 14 – GRÁFICO DE DEMANDA POR FASE DE VOO COM CONFIGURAÇÃO 1 FINAL	68
FIGURA 15 – GRÁFICO DE DEMANDA POR FASE DE VOO, CONFIGURAÇÃO 2	78
FIGURA 16 – GRÁFICO DE DEMANDA POR FASE DE VOO COM CONFIGURAÇÃO 2 FINAL	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VAZÃO MÁXIMA POR DIÂMETRO DE TUBO.....	34
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS DE ALUMÍNIO.....	35
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS DE AÇO INOX.....	36
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS DE TITÂNIO	36
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO SKYDROLL 500 B-4	37
TABELA 6 – SEQUÊNCIA DE ACIONAMENTO	42
TABELA 7 – SIMBOLOGIA	42
TABELA 8 – EXEMPLO DE VALORES DE ENTRADA.....	43
TABELA 9 – DEMANDA DO ATUADOR DE 1800 PSI.....	50
TABELA 10 – DEMANDA DO ATUADOR DE 2000 PSI.....	50
TABELA 11 – DEMANDA EM GPM DA CONFIGURAÇÃO 1.....	51
TABELA 12 – DEMANDA EM GPM DA CONFIGURAÇÃO 2	52
TABELA 13 – COMPRIMENTO DOS TUBOS.....	52
TABELA 14 – DADOS DO FLUIDO E DA BOMBA	53
TABELA 15 – SOMATÓRIA DE VAZÃO POR TRECHO	54
TABELA 16 – 1º PASSO - FASE 2, CONFIGURAÇÃO 1	54
TABELA 17 – 2º PASSO - FASE 2, CONFIGURAÇÃO 1	55
TABELA 18 – CÁLCULO DA PERDA DE CARGA POR TUBO	56
TABELA 19 – PERDA DE CARGA POR COMPONENTE.....	56
TABELA 20 – PRESSÃO DISPONÍVEL NO ATUADOR	57
TABELA 21 – RESULTADO TUBOS FASE 2, CONFIG. 1.....	59
TABELA 22 – PRESSÃO NOS ATUADORES, FASE2.....	59
TABELA 23 – TUBOS FASE 1	60
TABELA 24 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 1	61
TABELA 25 – TUBOS FASE 2	61
TABELA 26 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 2	62
TABELA 27 – TUBOS FASE 3	62
TABELA 28 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 3	63
TABELA 29 – TUBOS FASE 4	63
TABELA 30 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 4	64

TABELA 31 – TUBOS FASE 5	64
TABELA 32 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 5	65
TABELA 33 – PRESSÃO POR ATUADOR	65
TABELA 34 – CONFIGURAÇÃO FINAL DE TUBOS	67
TABELA 35 – PRESSÃO POR ATUADOR COM CONFIGURAÇÃO FINAL	67
TABELA 36 – PESO DA TUBULAÇÃO USANDO TITÂNIO.....	69
TABELA 37 – PESO DA TUBULAÇÃO USANDO AÇO INOX	70
TABELA 38 – CONFIGURAÇÃO 1 FINAL	71
TABELA 39 – TUBOS FASE 1	72
TABELA 40 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 1	73
TABELA 41 – TUBOS FASE 2	73
TABELA 42 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 2	74
TABELA 43 – TUBOS FASE 3	74
TABELA 44 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 3	75
TABELA 45 – TUBOS FASE 4	75
TABELA 46 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 4	76
TABELA 47 – TUBOS FASE 5	76
TABELA 48 – PRESSÃO NOS ATUADORES NA FASE 5	77
TABELA 49 – PRESSÃO POR ATUADOR	77
TABELA 50 – CONFIGURAÇÃO FINAL DE TUBOS	79
TABELA 51 – PRESSÃO POR ATUADOR COM CONFIGURAÇÃO FINAL	79
TABELA 52 – PESO DA TUBULAÇÃO USANDO TITÂNIO.....	81
TABELA 53 – PESO DA TUBULAÇÃO USANDO AÇO INOX	82
TABELA 54 – CONFIGURAÇÃO 2 FINAL	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AIR	Aerospace Information Report
ARP	Aerospace Recommended Practice
AMS	Aerospace Material Specification
AS	Aerospace Standard
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

P_s	Pressão estática
ρ	Densidade do fluido
g	Aceleração da gravidade
h	Diferença de altura entre os pontos de referência
V	Velocidade média do fluido
P_f	Perda de pressão devido ao atrito
f	Coefficiente de atrito
L	Comprimento do tubo
D	Diâmetro interno do tubo
Re	Número de Reynolds
ν	Viscosidade cinemática
F	Força
A	Área
Δp	Perda de carga total
Q	Vazão
ξ	Coefficiente de perda de carga
λ	Incógnita
θ°	Graus
gpm	Galões por minuto
psi	Pound per square inch
lb	Libras
ft	Pé

m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
kg	Quilograma
s	Segundo
Pa	Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	SISTEMA HIDRÁULICO.....	21
2.2	SISTEMA HIDRÁULICO DE AERONAVES.....	21
2.3	USUÁRIOS DO SISTEMA HIDRÁULICO.....	23
2.4	FOCO DO DESENVOLVIMENTO.....	23
2.4.1	Controle de voo.....	24
2.4.2	Controle de voo primário.....	24
2.4.3	Controle de voo secundário.....	25
2.5	PRINCÍPIO DE PASCAL.....	25
2.6	PRINCÍPIO DE BERNOULLI.....	26
2.7	NÚMERO DE REYNOLDS.....	28
2.8	COEFICIENTE DE ATRITO.....	30
2.9	VISCOSIDADE.....	31
2.10	PERDA DE CARGA.....	31
2.11	PRESSÃO DO SISTEMA.....	34
2.12	VELOCIDADE MÁXIMA DO FLUIDO.....	34
2.13	MATERIAL DA TUBULAÇÃO.....	35
2.13.1	Tubos de alumínio.....	35
2.13.2	Tubos de aço inox.....	36
2.13.3	Tubos de titânio.....	36

2.14	FLUÍDO HIDRÁULICO E SUAS CARACTERÍSTICAS	37
2.15	DEFINIÇÃO DOS ATUADORES.....	37
2.16	DEFINIÇÃO DA BOMBA HIDRÁULICA	38
2.17	PERDA DE CARGA NA BOMBA	38
2.18	DEFINIÇÃO DO FILTRO.....	39
2.19	PERDA DE CARGA NO FILTRO	39
2.20	DEFINIÇÃO DO RESERVATÓRIO.....	39
2.21	DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA HIDRÁULICO	40
2.22	SIMBOLOGIA.....	42
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	EXEMPLO DE PERDA DE CARGA EM TUBO.....	43
3.2	PESO DO TUBO P1.....	47
3.3	PERDA DE CARGA NO FILTRO	47
3.4	PERDA DE CARGA DO RESERVATÓRIO	47
3.5	PERDA DE CARGA NA BOMBA	48
3.6	PRESSÃO NO ATUADOR.....	48
4	DESENVOLVIMENTO	49
4.1	FASES DE VOO	49
4.2	CONFIGURAÇÃO DE COMANDO DE VOO	51
4.3	DADOS DE ENTRADA	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	RESULTADOS CONFIGURAÇÃO 1.....	60
5.1.1	Resultados por fase de voo	60
5.1.2	Resumo dos resultados obtidos.....	65
5.1.3	Peso da tubulação	68

5.1.4	Resultado final da configuração 1.....	71
5.2	RESULTADOS CONFIGURAÇÃO 2.....	72
5.2.1	Resultados por fase de voo	72
5.2.2	Resumo dos resultados obtidos.....	77
5.2.3	Peso da tubulação	80
5.2.4	Resultado final da configuração 2.....	83
5.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	84
5.4	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	85
5.4.1	Ferramenta de comparação de configurações	85
5.4.2	Incluir válvulas e conexões hidráulicas.....	85
5.4.3	Dimensionamento de válvulas e atuadores	86
6	CONCLUSÃO	87

1 INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluídos é uma parte da física que tem como objetivo estudar o comportamento de um determinado fluído seja ele em repouso ou em movimento, levando em consideração a conversão de energia, o transporte, a regulação e o controle do mesmo. Através dela surgiram os sistemas hidráulicos que são amplamente utilizados em diversas áreas de tecnologia.

O uso da tecnologia hidráulica tem como premissa gerar força e / ou movimento através da pressurização do fluído sendo que o mesmo é empregado quando há necessidade de grandes demandas de energia. Seu uso é muito comum para o acionamento de sistemas de aeronaves, tais como os trens de pouso, freios e outros comandos que permitem controlar o avião tanto em solo quanto em voo. Se comparado a outras tecnologias que executam a mesma função, sua vantagem pode ser considerada o baixo custo operacional, manutenção simples e esporádica além de robustez e baixo peso. Para o dimensionamento do sistema é necessário conhecer os requisitos de todos os componentes que serão atuados pela hidráulica, tais como o tempo de atuação, vazão, pressão necessária e outros parâmetros. Todos esses fatores influenciam nas características dos equipamentos a serem instalados na aeronave.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Dimensionar um sistema hidráulico que seja capaz de atender os requisitos de pressão mínima de operação definidos para os atuadores de aileron, leme e profundor de uma aeronave, calculando as linhas de pressão e retorno com os diâmetros adequados às necessidades de cada atuador, visando alcançar o menor peso, parâmetro essencial no desenvolvimento de um produto aeronáutico para que o mesmo seja econômico e conseqüentemente aceito no mercado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Escolher a tubulação hidráulica exige um estudo que equilibre custo, peso e eficiência. Tubos de maiores diâmetros são mais pesados, dificultam a montagem e manutenção, ocupam mais espaço, são mais caros, porém conduzem o fluido com menor perda de carga. A redução do diâmetro do tubo pode afetar a performance, devido a maior perda de carga, diminuindo o tempo de acionamento dos atuadores, não atendendo os requisitos de controlabilidade e performance afetando a qualidade do controle de voo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA HIDRÁULICO

Sistema hidráulico é um sistema onde um líquido sob pressão é utilizado para transmitir energia. Este sistema retira a potência de um motor (ou movimento) e converte em energia hidráulica, por meio de uma bomba. Esta energia pode ser distribuída por todo o avião por meio de tubos que correm ao longo da aeronave. (Keller, 1969)

É composto por três partes, sendo elas: geração, controle e aplicação de energia. A geração é a responsável por armazenar, filtrar, direcionar e gerar vazão no fluido. O controle, através de diversas válvulas, tem a função de controlar a pressão, permitir a vazão e a direção do fluido pelos tubos. Já a aplicação de energia é a transformação da energia hidráulica em potência mecânica através dos atuadores, que proporcionam uma ação mecânica em resposta a pressão. (Keller, 1969)

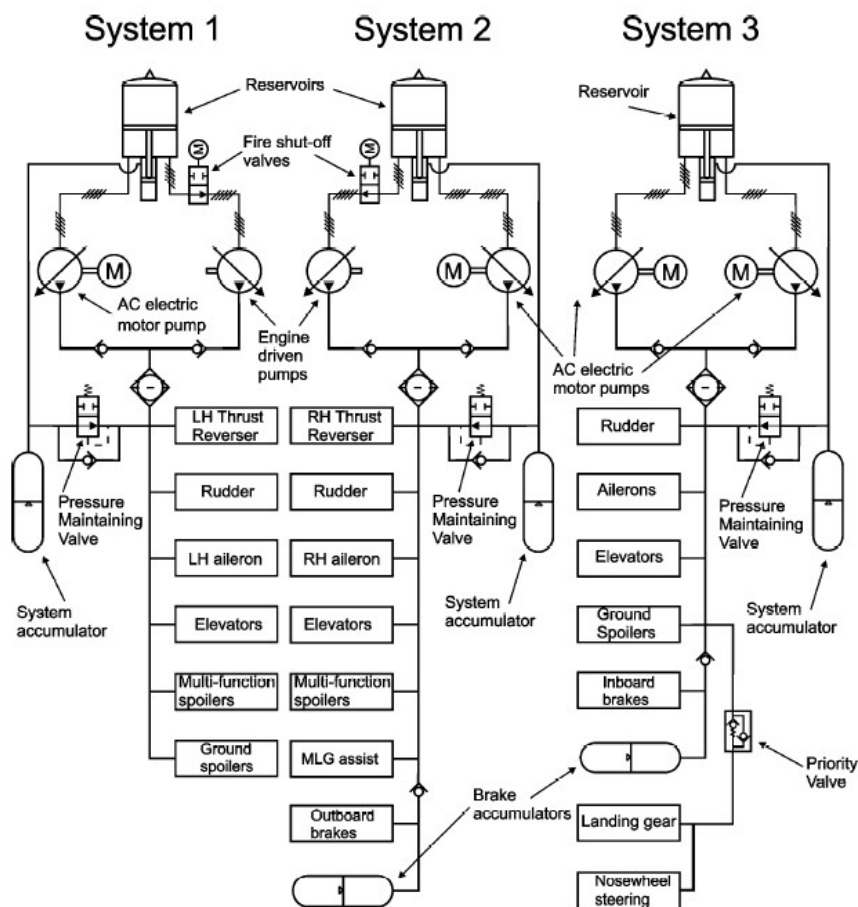
2.2 SISTEMA HIDRÁULICO DE AERONAVES

Antigamente, até a década de 1930, os comandos de voo eram executados mecanicamente através de diversas polias e cabos de aço que percorriam todo o avião. Este tipo de instalação tinha algumas desvantagens como o peso elevado e também a necessidade de os pilotos executarem grandes forças para que o comando fosse realizado. Conforme as aeronaves foram aumentando de tamanho, este tipo de mecânica passou a ser inviável, pois para que os comandos executassem seus movimentos era exigida uma energia muito maior. Por isto o sistema hidráulico começou a ser empregado por ser um método efetivo e eficiente de amplificação de potência, onde um pequeno esforço dos pilotos resultava em uma grande saída de energia conseguindo assim alcançar a força necessária de trabalho. Outras vantagens que a hidráulica oferece é a capacidade de lidar com

várias cargas simultaneamente, rápidas respostas, controle preciso das taxas de carga, serve como lubrificante para aumentar a vida útil dos componentes, entre outros. Um exemplo de modelo que iniciou o uso da hidráulica foi o Douglas DC-3, um avião bimotor para uso civil que revolucionou o transporte de passageiros nas décadas de 1930 e 1940. (FAA, 2014)

Cada aeronave possui a sua arquitetura de sistema que é o modelo conceitual que define a estrutura, comportamento, arranjo e interligação de fontes de energia hidráulica e seus consumidores de uma forma que atenda aos requisitos de controlabilidade do avião. Nela podem ser incluídos os componentes, as relações entre eles e os sistemas desenvolvidos, que irão trabalhar em conjunto para compor o sistema em geral. A figura 1 abaixo mostra um exemplo de arquitetura de um modelo da Bombardier. (AIR 5005, 2015)

Figura 1 – Bombardier Regional Jet 700/900 Hydraulic System



Fonte: AIR 5005 (2015)

É possível notar na figura 1 que existem três sistemas hidráulicos independentes em uma única arquitetura. Geralmente as aeronaves de grande porte possuem três ou mais sistemas empregados por questões de segurança, para que caso ocorra a falha e perda de um deles, os comandos não sejam perdidos e o piloto possa realizar um pouso normal. Estes tipos de requisitos são descritos pelos órgãos reguladores que são os responsáveis por certificar o avião e permitir a sua comercialização.

Uma condição de falha catastrófica não deve resultar da falha de um único componente, parte ou elemento de um sistema. A contenção de falhas deve ser fornecida pelo projeto do sistema para limitar a propagação dos efeitos de uma única falha e impedir condições de falha catastrófica. Além disso, não deve haver uma falha de causa comum que possa afetar tanto o componente único, a parte, quanto o elemento e suas disposições de contenção de falha. (EASA, 2017)

2.3 USUÁRIOS DO SISTEMA HIDRÁULICO

A hidráulica é utilizada na aviação para executar comandos que exigem uma grande quantidade de energia. Normalmente, na maior parte dos aviões, ela pode ser encontrada na extensão e retração dos trens de pouso, freios, rotação do trem de pouso dianteiro para mudar a direção do avião quando o mesmo está em solo, abertura e fechamento dos spoilers localizados nas asas e em diversos controles de voo. (FAA, 2014)

2.4 FOCO DO DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem a premissa de estudar e dimensionar um sistema hidráulico que faça o acionamento dos controles primários de voo definindo a melhor combinação possível de tubulações e atuadores levando em consideração o peso da instalação. Para que isto seja possível, é necessário basear-se em diversos princípios e teorias descritas ao longo das décadas passadas.

2.4.1 Controle de voo

Os controles de voo são superfícies responsáveis por proporcionar uma alteração aerodinâmica que permite mudar a direção da aeronave, aumentar ou diminuir a sustentação dependendo da fase do voo e também auxiliar na frenagem quando em solo. Estes controles são divididos em dois tipos, sendo eles: controle primário e secundário. (FAA, 2014)

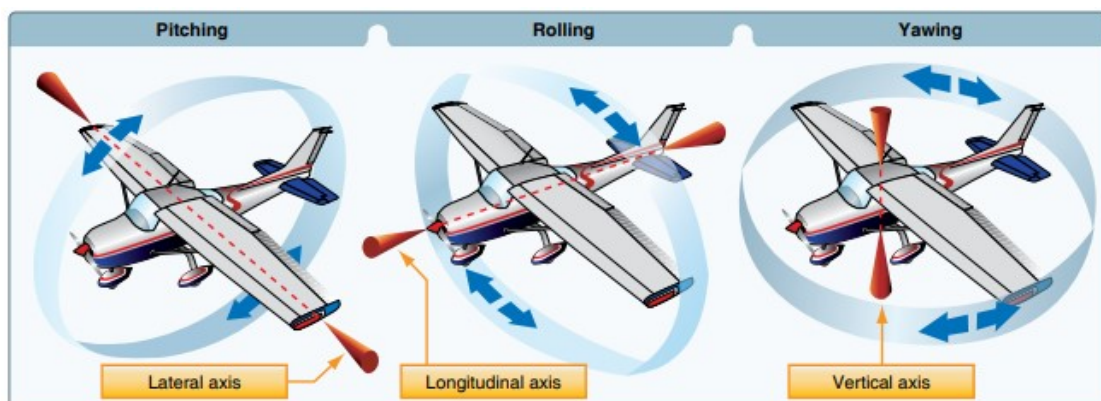
2.4.2 Controle de voo primário

O controle de voo primário são as superfícies que possibilitam que a aeronave faça movimentos em torno dos eixos lateral, longitudinal e vertical. Estes movimentos são:

- Arfagem (Pitching): ocorre em torno do eixo lateral pela ação do profundor.
- Rolagem (Rolling): ocorre em torno do eixo longitudinal pela ação dos ailerons.
- Guinada (Yaw): ocorre em torno do eixo vertical pela ação do leme.

Estes movimentos e eixos podem ser observados na Figura 2 abaixo. (Homa, 2017)

Figura 2 – Movimentos gerados pelo controle de voo primário



Fonte: FAA, (2014)

A localização do profundor, aileron e leme em uma aeronave pode ser observada na Figura 3.

2.4.3 Controle de voo secundário

O controle de voo secundário é utilizado para aumentar ou diminuir a sustentação aerodinâmica através dos flaps e slats e auxiliam em curvas e frenagem através dos spoilers. Seu funcionamento não será aprofundado, pois estes comandos não serão levados em consideração nos cálculos. A localização pode ser observada na Figura 3. (FAA, 2014)

Figura 3 – Air France Cargo Boeing 747-400F – Controles de voo



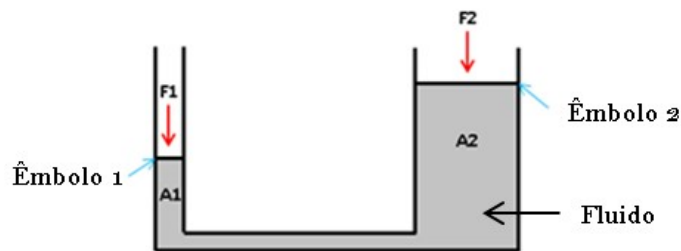
Fonte: Airplane-Pictures.net (2017)

2.5 PRINCÍPIO DE PASCAL

De acordo com o físico Blaise Pascal, quando uma pressão é aplicada em um determinado ponto, ela é transportada para outro ponto, através da utilização de um fluido, na teoria considerada incompressível, assim como ilustrado na Figura 4. Assim, quando o óleo é pressurizado para dentro da câmara do pistão, o mesmo avança ou recua dependendo do comando adotado. É desta maneira que um

sistema hidráulico funciona, transmitindo força através de um fluido. Ao se utilizar pistões com diferentes áreas internas, a multiplicação de força pode ser alcançada. Assim sendo, uma carga mais pesada pode ser erguida por uma força relativamente menor, utilizando esse princípio. (Massey, 2002)

Figura 4 – Princípio de Pascal



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 4, o Princípio de Pascal pode ser expresso pela fórmula 1:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (1)$$

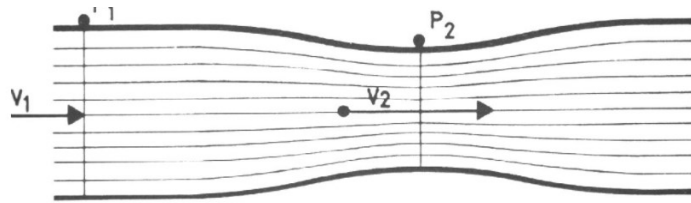
Onde, **F₁** e **F₂**: forças aplicadas aos êmbolos 1 e 2

A₁ e **A₂**: áreas dos êmbolos 1 e 2

2.6 PRINCÍPIO DE BERNOULLI

O princípio de Bernoulli descreve o comportamento dos fluidos em movimento no interior de um tubo fechado. Segundo o físico suíço Daniel Bernoulli, a velocidade e pressão de uma partícula de um fluido alteram dependendo do diâmetro da tubulação em que está ocorrendo o escoamento. (Massey, 2002)

De acordo com a Figura 5, sendo o diâmetro da parte central do tubo menor que nas duas extremidades, o escoamento é mais rápido na região mais estreita (V₂) e a pressão (P₂) é menor. Já nas extremidades, o escoamento é mais lento na região mais larga (V₁) e a pressão (P₁) é maior. (Brunetti, 2018)

Figura 5 – Princípio de Bernoulli

Fonte: BRUNETTI, (2005)

Logo, a pressão e vazão entre dois pontos podem ser relacionadas através da equação de Bernoulli (fórmula 2) de fluxo para fluidos incompressíveis:

$$P_s + \rho \times g \times h + \left(\frac{\rho \times V^2}{2} \right) + P_f = \text{Constante} \quad (2)$$

Onde:

P_s - Pressão estática (Pa)

ρ - Densidade do fluido (g/cm³)

g - Gravidade (m/s²)

h - Diferença de altura entre os pontos de referência

V - Velocidade média do fluido (m/s)

P_f - Perda de pressão devido ao atrito (Pa)

A velocidade do fluido irá depender da relação entre a vazão disponibilizada pela bomba e a vazão requisitada pelos atuadores, sendo que vazão é a quantidade de volume de fluido que passa em um determinado tempo dentro da tubulação. (Keller, 1969)

O processo de dimensionamento das tubulações deve minimizar a perda de pressão devido ao atrito através da escolha do diâmetro e do comprimento dos tubos, pois resulta em perda de performance dos usuários do sistema. (Keller, 1969)

A perda de pressão ao longo do tubo devido ao atrito do fluido com sua parede (P_f) é calculado através da fórmula 3 de Darcy-Weisbach. (Keller, 1969)

$$P_f = \frac{f \times L \times \rho \times V^2}{(2 \times D)} \quad (3)$$

f - Coeficiente de atrito

L - Comprimento do tubo (m)

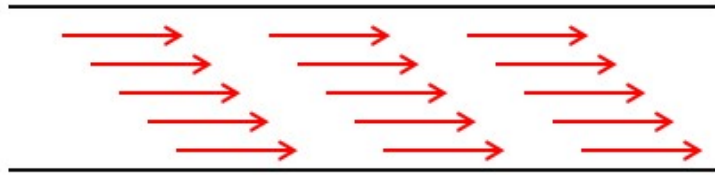
D - Diâmetro interno do tubo (m)

O coeficiente de atrito depende do tipo de regime de escoamento do fluido que está transitando no tubo, definido pelo cálculo de número de Reynolds. (Keller, 1969)

2.7 NÚMERO DE REYNOLDS

Segundo o conceito de George Gabriel Stokes, em um escoamento de um determinado fluido existem diferentes regimes que variam de acordo com a sua vazão. O coeficiente ou número de Reynolds é um número adimensional utilizado para calcular estes regimes de escoamento e tem seu nome oriundo de Osborne Reynolds, físico e engenheiro hidráulico. Os diferentes regimes são classificados basicamente em três níveis e variam conforme a velocidade do fluido e diâmetro do tubo. (Fox & McDonald, 2004)

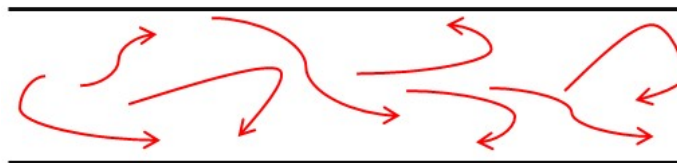
Quando ocorrem pequenas vazões, é possível notar que o fluido se comporta como uma lâmina, ou seja, ele transita pela tubulação sem perturbação, sendo assim denominado como escoamento laminar conforme Figura 6.

Figura 6 – Escoamento Laminar

Fonte: Elaborado pelo autor

Em vazões intermediárias, ou seja, entre a laminar e a turbulenta, o fluido apresenta leves flutuações sendo denominado como fase de transição ou regime instável (Introdução à Mecânica dos Fluidos, Fox & McDonald, p.215).

Em grandes vazões o fluido pode apresentar perturbação, sendo assim denominado como escoamento turbulento conforme Figura 7.

Figura 7 – Escoamento Turbulento

Fonte: Elaborado pelo autor

O cientista britânico Osborne Reynolds realizou experimentos que comprovam que quando o número de Reynolds é menor que 2300 o escoamento é classificado como laminar e quando maior que 4000, é classificado como turbulento. Para valores de Reynolds entre 2300 e 4000 indicam que o fluido se encontra em um escoamento de transição ou instável, ou seja, ora ele pode estar em regime turbulento ora em regime laminar. Esses valores dependem e apresentam variações, conforme o fluido é introduzido nos tubos, se de forma suave ou abrupta. (Fox & McDonald, 2004)

O número de Reynolds pode ser encontrado através da fórmula 4 que faz uma relação entre forças de inércia e forças viscosas, podendo ser expressa por:

$$\text{Re} = \frac{DV\rho}{\mu} \quad \text{ou} \quad \text{Re} = \frac{DV}{\nu} \quad (4)$$

Onde,

D – diâmetro do tubo (m)

V – velocidade média do fluido (m/s)

μ - viscosidade dinâmica do fluido (m^2/s)

ρ - massa específica do fluido (kg/m^3)

ν – viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

No caso específico da tubulação hidráulica de aeronaves, o regime de escoamento turbulento deve ser evitado, pois tal escoamento ocasiona diversos problemas, entre eles: ruídos excessivos no sistema, maior perda de carga nas linhas e instabilidade nas válvulas (ARP 994, 2004).

2.8 COEFICIENTE DE ATRITO

O cálculo do coeficiente de atrito depende do tipo de escoamento do fluido, para escoamento laminar aplica-se a fórmula 5:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5)$$

No caso de escoamento turbulento aplicam-se diversas outras equações dependendo do range de número de Reynolds em que o escoamento está sujeito. Como no dimensionamento de sistema hidráulico de aeronaves o escoamento turbulento não deve ocorrer, estas não serão levadas em consideração.

“Desta forma no escoamento laminar, o fator de atrito é uma função do número de Reynolds apenas e independe da rugosidade”. (FOX et al., 2004).

2.9 VISCOSIDADE

De acordo com o matemático e físico George Gabriel Stokes, entende-se como viscosidade a resistência física de um fluido ao escoamento. Quanto maior a viscosidade, maior é a resistência ao movimento e menor é sua capacidade de escoar. Um líquido como a gasolina, que possui uma baixa viscosidade, escoar facilmente enquanto que, um líquido como o melado escoar lentamente, pois tem uma alta viscosidade. A viscosidade também aumenta ou diminui de acordo com a temperatura do fluido. Um líquido satisfatório para um dado sistema hidráulico deve ter uma viscosidade alta o suficiente para permitir uma boa vedação nas bombas, válvulas e pistões, mas não pode ser tão grosso que ofereça resistência ao escoamento, pois líquidos com alta viscosidade levam a perdas de potência e a temperaturas de operação mais altas. Esses fatores somados à carga e ao desgaste excessivo das partes geram uma preocupação grande. Por outro lado, um fluido muito fino também levará a um rápido desgaste de componentes do sistema. (Massey, 2002)

2.10 PERDA DE CARGA

Em uma aeronave existem diversos tipos de sistemas e equipamentos para serem instalados como a hidráulica, elétrica, propulsão, ar condicionado e estruturas, por isso o pouco espaço que existe é muito disputado o que obriga a criação de diversas curvas na tubulação para que a mesma seja acomodada no avião. Por este motivo, a quantidade de curvas deve ser analisada para prever a perda de carga que cada uma delas irá causar no fluido, e com isso dimensionar a pressão e vazão de maneira correta para o funcionamento dos comandos de voo.

De acordo com LINSINGEN (2001), em tubulações as perdas de carga estão associadas às perdas contínuas e perdas localizadas. As contínuas estão relacionadas às perdas que ocorrem devido ao atrito entre o fluido e a parede do tubo. Elas dependem de alguns fatores, dentre eles os comprimentos da tubulação. A fórmula 6 abaixo representa perdas contínuas de carga:

$$\Delta p = f \frac{l}{D} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (6)$$

Onde: Δp → diferença de pressão entre dois pontos, ou perda de carga no trecho;

l → comprimento da tubulação (m)

D → diâmetro interno da tubulação (m)

ρ → massa específica do fluido (kg/m^3)

v → velocidade do fluido na tubulação (m/s)

f → coeficiente de atrito

A velocidade do fluido na tubulação pode ser encontrada através da fórmula 7 abaixo:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Onde: V → velocidade do fluido na tubulação (m/s)

Q → vazão do fluido (m^3/s)

A → Área interna do tubo (m^2)

A área circular encontra-se através da fórmula 8:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

Além do comprimento efetivo das tubulações, a perda de carga ocorre em ângulos de tubulações. A perda de carga nesses elementos obedece à seguinte relação, conforme fórmula 9. O fator ξ é característico para cada elemento. (Linsingen, 2001)

$$\Delta p = \xi \frac{\rho}{2} v^2 \quad (9)$$

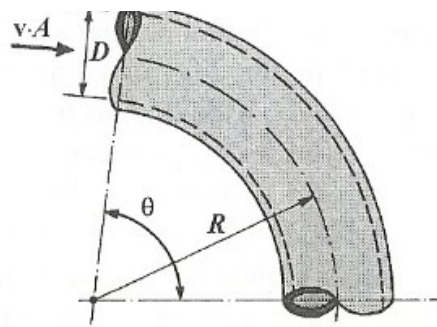
Onde: $\xi \rightarrow$ coeficiente de perda de carga

$\rho \rightarrow$ massa específica do fluido (kg/m^3)

$v \rightarrow$ velocidade do fluido na tubulação (m/s)

Conforme mostrado na figura 8, utiliza-se uma relação entre o raio de curvatura R e o diâmetro interno D maior que 2 ($R/D > 2$), e qualquer ângulo de curvatura, para números de Reynolds compreendidos entre 10^2 e 10^4 , o coeficiente de perda de carga pode ser estimado através da fórmula 10 apresentada por Idel'cik. (Linsingen, 2001)

Figura 8 – Curvas com $R/D > 2$



Fonte: Linsingen, (2001)

$$\xi = 0,0175\lambda \frac{R}{D} \theta^\circ \quad (10)$$

Onde θ é dado em graus, e λ é determinado por meio de:

$$10^2 \leq \text{Re} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,5} \leq 6 \cdot 10^2 \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{20}{\text{Re}^{0,65}} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,175} \quad (11)$$

$$6 \cdot 10^2 \leq \text{Re} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,5} \leq 1,4 \cdot 10^3 \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{10,4}{\text{Re}^{0,55}} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,225} \quad (12)$$

$$1,4 \cdot 10^3 \leq \text{Re} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,5} \leq 5 \cdot 10^3 \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{5}{\text{Re}^{0,45}} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,275} \quad (13)$$

Para os cálculos será adotado um valor de raio de curvatura igual a quatro vezes o diâmetro externo do mesmo ($4D$).

2.11 PRESSÃO DO SISTEMA

A pressão nominal do sistema hidráulico é de 3000 psi. Um dos fatores utilizados para dimensionar as tubulações hidráulicas é a pressão mínima no usuário. Se não houver um valor mínimo de pressão no momento de atuação, a performance será comprometida. A pressão mínima a ser disponibilizada pelo sistema no usuário deve ser 2/3 do valor da pressão nominal do sistema. Assim sendo, caso o valor seja menor deve-se procurar soluções, a princípio redimensionando as tubulações hidráulicas, alterando parâmetro de componentes, como por exemplo aumentar a potência da bomba ou mesmo mudar a arquitetura do sistema. Como a pressão nominal do sistema é de 3000 psi, a pressão mínima que o sistema deve prover para o atuador será de 2000 psi. (ARP 24E, 2005)

Essa recomendação é utilizada quando não se conhece a pressão mínima do atuador a ser utilizado no sistema.

2.12 VELOCIDADE MÁXIMA DO FLUIDO

A velocidade máxima do fluido hidráulico na tubulação não deve exceder 15 ft/s (4,6m/s) (ARP 994, 2004), restringindo vazões máximas por diâmetro de tubo conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Vazão máxima por diâmetro de tubo

Diâmetro do tubo (dash)	Diâmetro do tubo (mm)	Vazão (gpm)
-4	6,35	1,2
-5	7,93	2,3
-6	9,52	3,5
-8	12,7	6
-10	15,87	10,5
-12	19,05	16
-16	25,4	29
-20	31,75	45
-24	38,1	70

Fonte: ARP 994, (2004)

Logo, através do princípio de Bernoulli, a variação do diâmetro do tubo (D) é calculada em função da vazão dos atuadores.

2.13 MATERIAL DA TUBULAÇÃO

O tipo de material que a tubulação recebe varia de acordo com a pressão que o tubo estará sujeito. As linhas de alta pressão são geralmente de aço (tabela 3) ou de titânio (tabela 4) por serem mais resistentes enquanto tubos de retorno, que possuem baixa pressão são de alumínio (tabela 2), material mais leve e barato. (ARP 994, 2004)

A escolha do titânio se deve ao fato de ser bem mais leve enquanto o aço é mais resistente e possui um custo bem menor, portanto fica a escolha do desenvolvedor ter um produto mais caro e mais leve no caso do titânio ou mais barato e mais pesado no caso do aço (ARP 994, 2004).

2.13.1 Tubos de alumínio

Tubo de alumínio, referência Aluminum Tube 6061-T6 Spec. AMS-T-7081.

Tabela 2 – Características dos Tubos de Alumínio

Diâmetro Externo do tubo (dash / mm)	Volume de fluido [litros/m]	Diâmetro interno [mm]	Espessura da parede [mm]	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	
-4	6,35	0,0164	4,57	0,889	0,041	0,0164	0,0574
-5	7,93	0,0297	6,15	0,889	0,049	0,0297	0,0787
-6	9,57	0,0477	7,79	0,889	0,065	0,0477	0,1127
-8	12,7	0,0937	10,92	0,889	0,089	0,0937	0,1827
-10	15,87	0,156	14,09	0,889	0,114	0,156	0,27
-12	19,05	0,2343	17,27	0,889	0,147	0,2343	0,3813
-16	25,4	0,4123	22,91	1,2446	0,256	0,4123	0,6683
-20	31,75	0,6725	29,26	1,2446	0,322	0,6725	0,9945
-24	38,1	0,9818	35,36	1,3716	0,4272	0,9818	1,409

Fonte: Spec. AMS-T-7081

2.13.2 Tubos de aço inox

Tubo de aço inox, referência: Cres Tube 21-6-9 Class 1 Spec. AMS 5561;

Tabela 3 – Características dos Tubos de Aço Inox

Diâmetro Externo do tubo (dash / mm)	Volume de fluido [litros/m]	Diâmetro interno [mm]	Espessura da parede [mm]	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	
-4	6,35	0,0241	5,54	0,4064	0,059	0,0241	0,0831
-5	7,93	0,0398	7,12	0,4064	0,0753	0,0398	0,1151
-6	9,57	0,0575	8,55	0,508	0,1127	0,0575	0,1702
-8	12,7	0,1017	11,38	0,6604	0,1956	0,1017	0,2973
-10	15,87	0,1594	14,24	0,8128	0,318	0,1594	0,4774
-12	19,05	0,2288	17,07	0,9906	0,462	0,2288	0,6908
-16	25,4	0,4068	22,76	1,3208	0,802	0,4068	1,2088
-20	31,75	0,6608	29,01	1,3716	0,954	0,6608	1,6148
-24	38,1	0,951	34,80	1,651	1,512	0,951	2,463

Fonte: Spec. AMS 5561

2.13.3 Tubos de titânio

Tubo de Titânio, referência: Titanium Tube 3 Al 2,5 V Spec. AMS 4945.

Tabela 4 – Características dos Tubos de Titânio

Diâmetro Externo do tubo (dash / mm)	Volume de fluido [litros/m]	Diâmetro interno [mm]	Espessura da parede [mm]	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	
-4	6,35	0,0241	5,54	0,4064	0,04	0,0241	0,0641
-5	7,93	0,0398	7,12	0,4064	0,048	0,0398	0,0878
-6	9,57	0,0582	8,60	0,4826	0,061	0,0582	0,1192
-8	12,7	0,1017	11,38	0,6604	0,112	0,1017	0,2137
-10	15,87	0,1594	14,24	0,8128	0,172	0,1594	0,3314
-12	19,05	0,2288	17,07	0,9906	0,278	0,2288	0,5068
-16	25,4	0,4086	22,81	1,2954	0,4369	0,4086	0,8455
-20	31,75	0,6356	28,45	1,651	0,7097	0,6356	1,3453
-24	38,1	0,951	34,80	1,651	0,7097	0,951	1,6607

Fonte: Spec. AMS 4945

2.14 FLUÍDO HIDRÁULICO E SUAS CARACTERÍSTICAS

O fluido hidráulico recomendado para a utilização é do tipo sintético a base de fosfato de éster desenvolvido especificamente para indústria aeronáutica, e a temperatura do fluido para o dimensionamento da tubulação será de -10°C , de acordo com requisitos aeronáuticos recomendados, portanto para este caso será adotado o Skydrol 500 B-4 com as características mostradas na tabela 5 abaixo: (ARP 994, 2004).

Tabela 5 – Características do Skydroll 500 B-4

Viscosidade (μ) a -10°C	0,000074924	m^2/s
Densidade a -10°C	1,081	g/cm^3

Fonte: Skydroll, (2018)

Para facilitar os cálculos, a densidade do fluido será considerada igual a $1\text{ g}/\text{cm}^3$.

2.15 DEFINIÇÃO DOS ATUADORES

De acordo com a ARP 24E, 2005, a pressão mínima que deve-se chegar no atuador é de $2/3$ da pressão nominal do sistema, que neste caso seria de 2000 psi, porém se já existir um atuador definido com a pressão de operação pré determinada pelo fornecedor, esta por sua vez deve ser respeitada mesmo se maior ou menor que o recomendado pela ARP 24E, 2005.

Para simular a escolha da melhor combinação a ser empregada na aeronave, serão considerados dois tipos de configuração de atuadores conforme será apresentado no item 4.2.

Este estudo fará a comparação entre duas arquiteturas de comando de voo e o conjunto tubulação mais configuração de atuadores que permitir o menor peso, será o escolhido.

2.16 DEFINIÇÃO DA BOMBA HIDRÁULICA

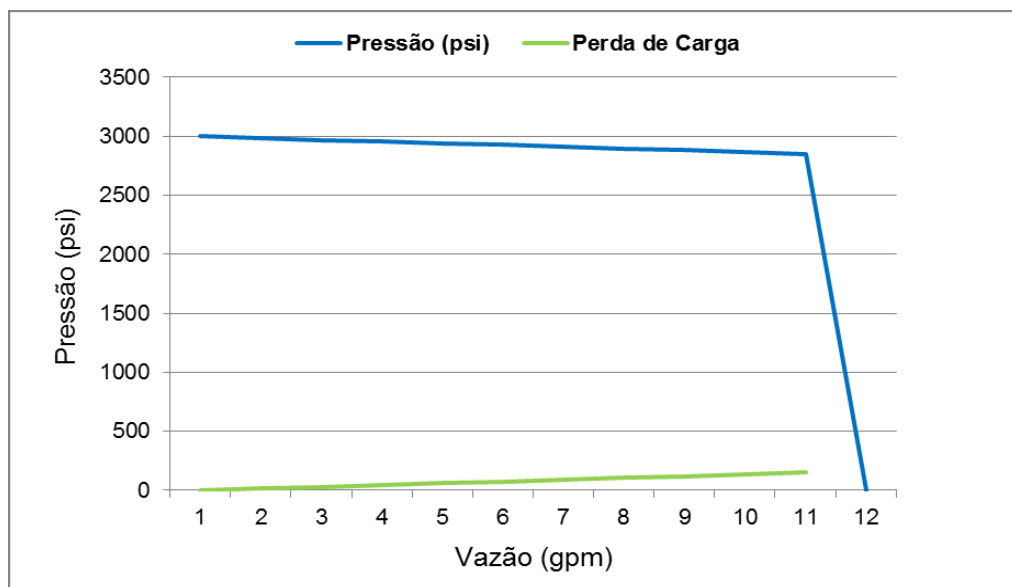
A bomba hidráulica é o equipamento responsável por gerar vazão ao fluido para que o sistema possa funcionar. Ela succiona o fluido de dentro do reservatório e direciona para seus usuários (AS595, 2015).

A vazão da bomba será determinada através da demanda solicitada pelos atuadores.

2.17 PERDA DE CARGA NA BOMBA

As bombas hidráulicas, independentemente de suas características, não podem ter uma perda de carga maior do que 5% quando se atinge a vazão máxima, ou seja, uma bomba que foi projetada para uma vazão máxima de 10 gpm e 3000 psi, pode ter uma perda máxima de 150 psi quando se atinge os 10 gpm conforme mostrado na figura 9. Caso a vazão máxima seja ultrapassada, a pressão da bomba despenca (AS595, 2015).

Figura 9 – Curva de Rendimento da Bomba



Fonte: Elaborado pelo autor

2.18 DEFINIÇÃO DO FILTRO

Todo sistema hidráulico necessita de um filtro para retirar possíveis partículas e contaminações que ficam no fluido, que o próprio fluxo no sistema pode causar ou então quando algum retrabalho é feito na tubulação, a fim de evitar o entupimento de alguma válvula ou a perda de desempenho (AIR 1922, 2017).

2.19 PERDA DE CARGA NO FILTRO

Através da fórmula 14 abaixo, é possível determinar a perda de carga do fluido ao passar pelo filtro.

$$\Delta P_{real} = \Delta P_{teórico} \times \left(\frac{Q_{real}}{q_{teórico}} \right)^2 \quad (14)$$

Onde:

DP real -> perda de carga total no filtro

DP teórico -> perda de carga em relação a 'q' teórico

q teórico -> vazão teórica do filtro em relação a DP teórico

Q real -> vazão real que chega no filtro

Para os cálculos será adotado um filtro com DP teórico de 200 psi para um q teórico de 18 gpm, sendo assim, dependendo a vazão gerada pela bomba, será encontrada a perda de carga no filtro, calculado pela fórmula 14.

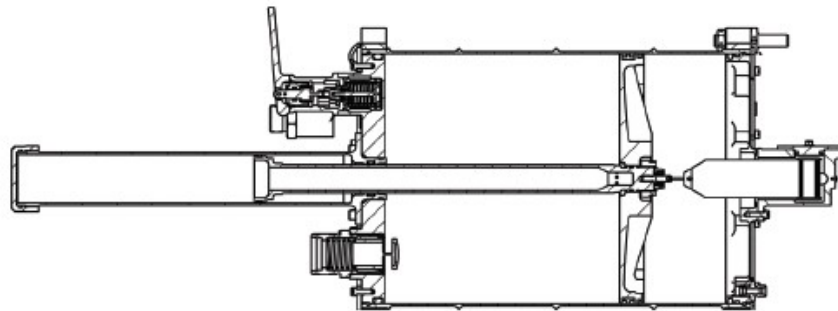
2.20 DEFINIÇÃO DO RESERVATÓRIO

Cada sistema independente deve ter seu próprio reservatório hidráulico. Entre suas funções estão o de armazenar o fluido excedente do sistema, fornecer fluido

para a linha de sucção da bomba, prover espaço para o ar ou gases do sistema, fazer a compensação das perdas com vazamento, entre outros (ARP4752, 2013).

O reservatório deve ser pressurizado para se evitar a cavitação das bombas. Um método utilizado de pressurização é o de incorporar um pistão e utilizar a própria pressão do sistema para atuar este pistão e obter a pressão necessária dentro do tanque. O valor da pressão do tanque atingido está diretamente relacionado à proporção das áreas dos pistões de alta e baixa pressão. Este tipo de reservatório é conhecido como um reservatório de bootstrap e pode ser observado na figura 10 abaixo (ARP4752, 2013).

Figura 10 – Reservatório tipo Bootstrap



Fonte: Arkquin Industries, (2018)

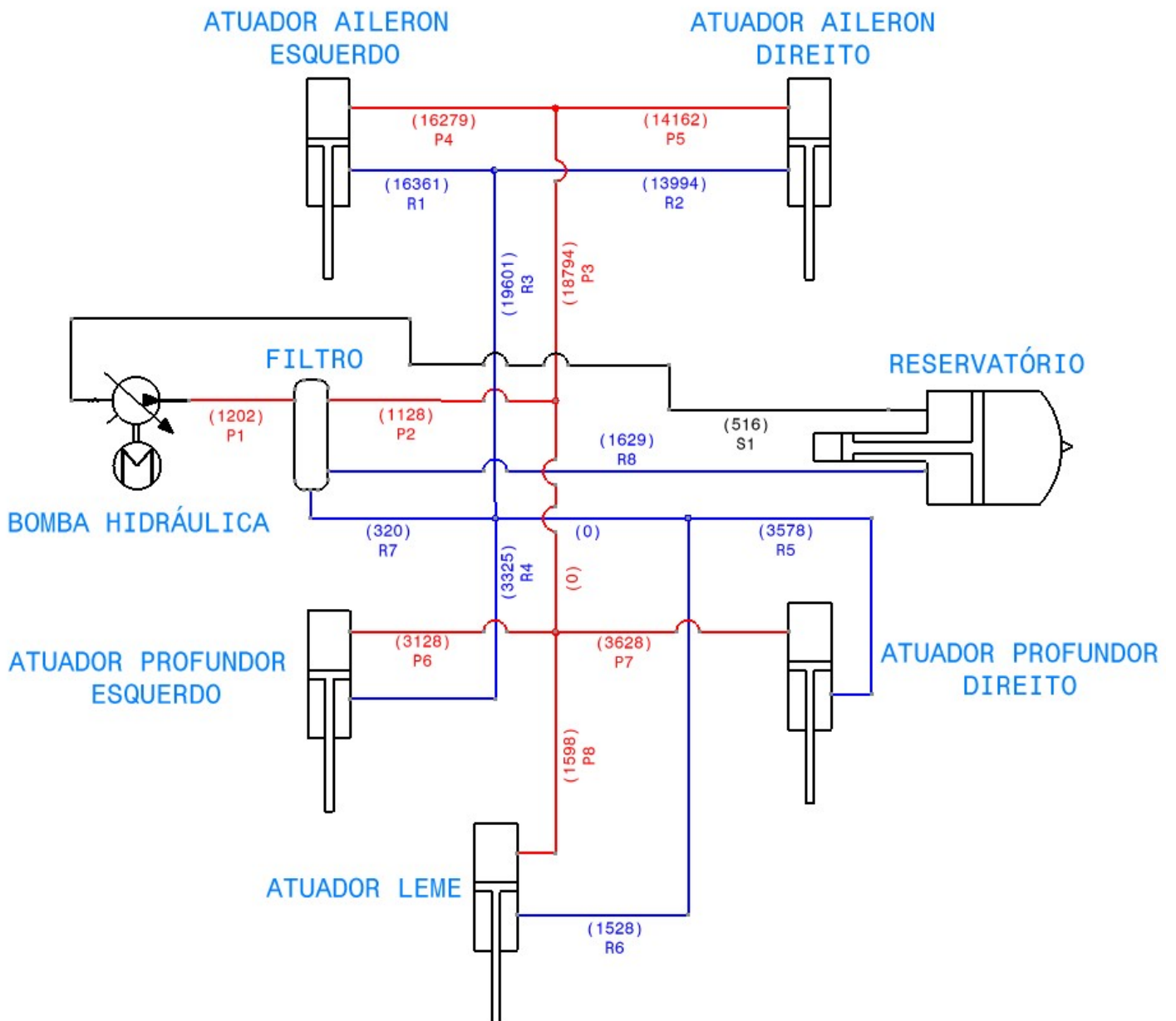
Para os cálculos, será adotado um reservatório bootstrap com pressão interna de 80 psi.

2.21 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA HIDRÁULICO

A Figura 11 representa a arquitetura definida para o sistema hidráulico responsável por acionar os ailerons, leme e profundores. Nela é possível identificar todos os componentes que consistem o sistema, assim como as linhas de pressão (em vermelho), de retorno (em azul) e a de sucção da bomba (em preto). Próximo de cada linha, existe um valor que corresponde ao comprimento em milímetros da tubulação instalada e também o nome dado a ela. Estes valores de comprimento são obtidos a partir da análise de projeto que faz o desenvolvimento das linhas em

softwares a partir da arquitetura, mas para este caso serão utilizados valores fictícios.

Figura 11 – Arquitetura do Sistema Hidráulico



Fonte: Elaborado pelo autor

A linha de sucção S1 não será levada em consideração nos cálculos.

A partir da arquitetura podemos adotar a seguinte sequência de acionamento para cada atuador conforme tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Sequência de Acionamento

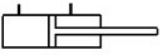
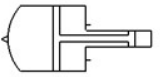
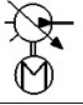
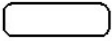
	Tipo de Acionamento	Sequência de Acionamento					
AILERONS	Pressão Aileron Direito	Bomba Hidráulica	Tubo P1	Filtro	Tubo P2	Tubo P3	Tubo P5
	Retorno Aileron Direito	Tubo R2	Tubo R3	Tubo R7	Filtro	Tubo R8	Reservatório
	Pressão Aileron Esquerdo	Bomba Hidráulica	Tubo P1	Filtro	Tubo P2	Tubo P3	Tubo P4
	Retorno Aileron Esquerdo	Tubo R1	Tubo R3	Tubo R7	Filtro	Tubo R8	Reservatório
PROFUNDORES	Pressão Profundor Direito	Bomba Hidráulica	Tubo P1	Filtro	Tubo P2	Tubo P7	
	Retorno Profundor Direito	Tubo R5	Tubo R7	Filtro	Tubo R8	Reservatório	
	Pressão Profundor Esquerdo	Bomba Hidráulica	Tubo P1	Filtro	Tubo P2	Tubo P6	
	Retorno Profundor Esquerdo	Tubo R4	Tubo R7	Filtro	Tubo R8	Reservatório	
LEME	Pressão Leme	Bomba Hidráulica	Tubo P1	Filtro	Tubo P2	Tubo P8	
	Retorno Leme	Tubo R6	Tubo R7	Filtro	Tubo R8	Reservatório	

Fonte: Elaborado pelo autor

2.22 SIMBOLOGIA

A partir da arquitetura adotada, a tabela 7 a seguir mostra o significado de cada símbolo apresentado segundo a ABNT NBR 8897.

Tabela 7 – Simbologia

	Cilindro ou atuador de dupla ação.
	Reservatório hidráulico pressurizado.
	Bomba hidráulica acionada eletricamente.
	Filtro genérico.

Fonte: ABNT NBR 8897, 1985

3 METODOLOGIA

Por conter uma grande quantidade de cálculos a serem realizados para se chegar a uma conclusão de quais os diâmetros e tubos ideais a serem empregados no sistema, o desenvolvimento deles serão realizados através do software Excel.

Para um bom entendimento de como serão feitos todos os cálculos no software, o passo a passo a seguir demonstra um exemplo para o dimensionamento de um tubo e por fim, como pode-se encontrar o valor de pressão que chega em um determinado atuador.

As unidades dos calculos são feitos no sistema internacional (SI) e no sistema Inglês, pois os Estados Unidos utilizam o sistema Inglês como padrão.

O resultado dos calculos do sistema internacional será apresentado entre parenteses e o sistema inglês entre colchetes.

3.1 EXEMPLO DE PERDA DE CARGA EM TUBO

Para o exemplo, será utilizado o tubo P1 como referência. Será adotado um valor de vazão (Q) para cada atuador, de 2 gpm. Como pode ser observado na figura 11 item 2.21 o tubo P1 fica logo após a bomba hidráulica e leva a vazão para todos os cinco atuadores, conclui-se então que no trecho do tubo P1 existe uma vazão de 10 gpm.

A tabela 8 abaixo mostra os valores de entrada para o tubo P1.

Tabela 8 – Exemplo de Valores de Entrada

Tubo	Comprimento "L" em (mm)	Material	Diâmetro Externo	Vazão em gpm	Viscosidade Cinemática do Fluido (m ² /s)	Densidade do Fluido (g/cm ³)
P1	1202	Aço Inox	-10	10	0,000074924	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Como esta linha é de alta pressão o material selecionado para ela é o aço inox e o diâmetro do tubo é de 15,87mm (-10) respeitando a vazão máxima de tubo conforme tabela 1 item 2.12.

A primeira etapa é calcular a área interna do tubo utilizando a fórmula (8) do item 2.10 conforme abaixo. O valor do diâmetro interno do tubo pode ser encontrado na tabela 3 item 2.13.2.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{então:} \quad = \frac{\pi \cdot 14,244^2}{4} \Big/ 1000000 \cong 1,59 \cdot 10^{-4} m^2$$

Obs: o valor da área foi dividido por 1000000 para transformar o valor de milímetros (mm²) para metros (m²).

Tendo a área interna do tubo e a vazão, pode-se encontrar a velocidade do fluido através da fórmula (7) do item 2.10, lembrando que para o cálculo a vazão deve estar em m³/s.

$$1gpm = 0,00006309m^3 / s , \text{ logo } 10gpm = 0,0006309m^3 / s$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{então:} \quad V = \frac{0,0006309}{1,54 \cdot 10^{-4}} \cong (3,96m / s) [13ft / s]$$

Conforme o item 2.12, o fluido está respeitando a velocidade máxima na tubulação que não deve exceder (4,6m/s) ou [15 ft/s].

Com os valores da velocidade (V), do diâmetro (D) e da viscosidade cinemática do fluido, é possível calcular o número de Reynolds através da fórmula (4) item 2.7 e posteriormente o coeficiente de atrito (f) pela fórmula (5) item 2.8:

$$\text{Re} = \frac{DV}{\mu} \quad \text{então:} \quad \text{Re} = \frac{0,014244 \cdot 3,96}{0,000074924} \cong 753$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{então:} \quad f = \frac{64}{753} \cong 0,085$$

Como mencionado no item 2.7, o número de Reynolds não deve ser superior à 2300 para que o fluxo seja laminar.

Contendo todos estes valores, faz-se o cálculo da perda de carga em parte reta de tubo através da fórmula (3) item 2.6 ou fórmula (6) item 2.10.

$$P_f = \frac{f \times L \times \rho \times V^2}{(2 \times D)} \quad \text{ou} \quad \Delta p = f \frac{1}{D} \frac{\rho}{2} v^2 \quad \text{então:}$$

$$\Delta p = 0,085 \cdot \frac{1,202}{0,014244} \cdot \frac{1000}{2} \cdot 3,96^2 \cong (56240 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2})$$

O valor da perda de carga será encontrado em Pascal ou kg/ms², e para passar este valor para psi, basta multiplicar por 0,0001450377 chegando assim a um perda de carga total em parte reta de tubo de aproximadamente 8,16 psi.

$$\Delta p_{total} \cong [8,16 \text{ psi}]$$

Feito o cálculo da perda de carga em parte reta de tubo, têm-se que calcular a perda de carga em curvas. Neste exemplo e também para os cálculos finais, foram consideradas uma curva de 90° para cada 1 metro de tubo. Como este tubo P1 possui 1,202m, será considerada apenas uma curva de 90°.

A perda em curvas é calculada através do item 2.10 utilizando fórmula (9), mas antes precisa-se encontrar o valor de λ utilizando a fórmula (11), (12) ou (13), e o valor do coeficiente de perda de carga, pela fórmula (10), dependendo do valor encontrado através do cálculo abaixo:

$$\text{Re} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,5} = 753 * \left(\frac{14,244}{2(4 * 15,87)} \right)^{0,5} = 252,21$$

$$R = 4 * D_{\text{externo}}$$

Como o valor encontrado está entre 100 e 600, a fórmula a ser utilizada para encontrar o valor de λ deve ser a (11), portanto:

$$\lambda = \frac{20}{\text{Re}^{0,65}} \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,175} = \frac{20}{753^{0,65}} \left(\frac{14,244}{2(4 * 15,87)} \right)^{0,175} = 0,184$$

Utilizando agora a fórmula (10), encontra-se o valor do coeficiente de perda de carga:

$$\xi = 0,0175 \lambda \frac{R}{D} \theta^\circ = 0,0175 * 0,184 * \frac{63,48}{14,244} 90^\circ = 1,29$$

Por fim, utilizando a fórmula (10), a perda de carga na curva será:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho}{2} v^2 = 1,29 * \frac{1000}{2} 3,96^2 = (10114,63 \text{ Pa}) \text{ ou } [1,46 \text{ psi}]$$

Somando-se a perda em parte reta e a perda em curva encontra-se a perda total de carga no tubo P1:

$$\Delta p = 56240 + 10114,63 = (66354,63 \text{ Pa})$$

$$\Delta p = 8,16 + 1,46 = [9,62 \text{ psi}]$$

3.2 PESO DO TUBO P1

Utilizando-se a tabela 3 do item 2.13.2, sabe-se que um metro de tubo deste diâmetro contendo fluido, pesa 0,4774 kg. Sendo assim, como o tubo P1 possui um comprimento total de 1,202 metros, calcula-se seu peso total:

$$P_{total} = 1,202 * 0,4774 = (0,573 \text{ kg}) [1,26 \text{ lb}]$$

3.3 PERDA DE CARGA NO FILTRO

Como descrito no item 2.19, está sendo adotado um DP teórico de 200 psi para um 'q' teórico de 18 gpm, e neste exemplo é considerado uma demanda total de 10 gpm (Q real), sendo assim, utilizando a fórmula (14) pode-se encontrar a perda de carga no filtro conforme abaixo:

$$\Delta p_{real} = 200 * \left(\frac{10}{18}\right)^2 = [61,72 \text{ psi}] (425544,4 \text{ Pa})$$

3.4 PERDA DE CARGA DO RESERVATÓRIO

De acordo com o item 2.20, a pressão interna do reservatório é de [80 psi] (551580,56 Pa). Como esta pressão é extraída do próprio sistema, este valor deve ser somado a perda de carga.

3.5 PERDA DE CARGA NA BOMBA

Utilizando o mesmo exemplo descrito no item 2.17, será considerado que a bomba tem capacidade de gerar [3000 psi] e esteja trabalhando na sua vazão total de 10 gpm, obtendo assim uma perda de carga total de [150 psi].

3.6 PRESSÃO NO ATUADOR

Para encontrar o valor da pressão que está chegando no atuador, deve-se subtrair todas as perdas de carga dos tubos e dos componentes. Para o entendimento, será utilizado como exemplo toda a sequência de acionamento do atuador do aileron direito conforme a tabela 6 item 2.21. Para os valores de P1, reservatório, filtro e bomba, serão utilizados os mesmo valores determinados acima. Já para os tubos P2, P3, P5, R2, R3, R7 e R8, serão adotados os valores [9,12psi]; [142,45psi]; [52,16psi]; [231,22psi]; [175,40psi]; [2,27psi] e [14,61psi] respectivamente. Assim sendo, basta subtrair todas estas perdas, do valor da pressão gerada pela bomba, no caso [3000 psi], conforme abaixo:

$$\Delta p = 3000 - 150 - 9,62 - 61,72 - 9,12 - 142,45 - 52,16 - 231,22 + \\ - 175,40 - 2,27 - 61,72 - 14,61 - 80 =$$

$$\Delta p = 3000 - 990,29 = [2009,71 \text{ psi}] (13\ 856\ 462,09 \text{ Pa})$$

Concluí-se então que a pressão no atuador do aileron direito é de [2009,71psi], atendendo a pressão mínima descrita no item 2.11.

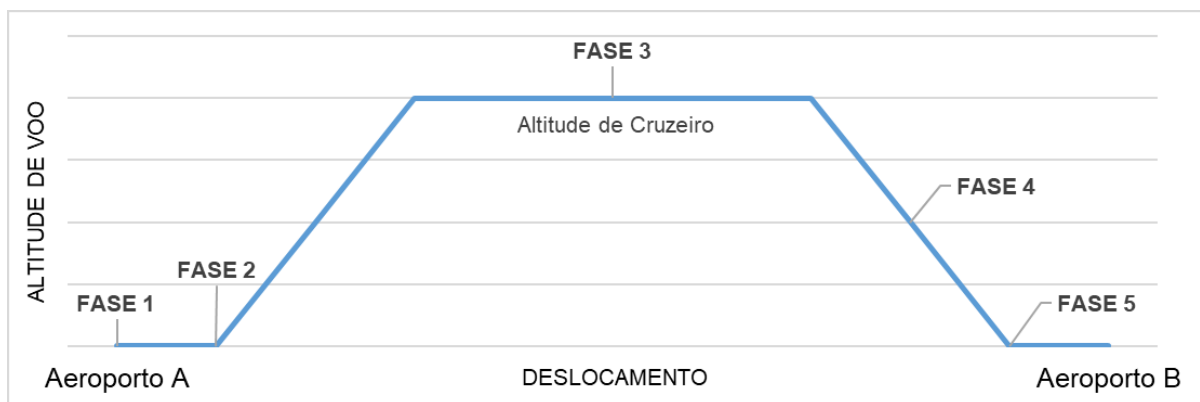
4 DESENVOLVIMENTO

4.1 FASES DE VOO

Para iniciar os cálculos, é necessário ter a exata demanda de cada atuador, porém a demanda varia dependendo da operação em que o avião esteja executando como, decolagem, pouso, voo de cruzeiro, entre outros. Estas operações são definidas como fases de voo, e o dimensionamento da hidráulica deve ser feito para que em qualquer fase de voo as pressões mínimas dos atuadores (tabelas 9 e 10) e a vazão limite (tabelas 11 e 12) sejam respeitados. (Wayne Stout, 2013)

Neste caso, serão levados em consideração cinco diferentes fases de voo conforme figura 12 abaixo, e o resultado final, terá que ser robusto o suficiente para atender o critério acima.

Figura 12 – Fases de Voo



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

- Fase 1: Corrida para decolagem -> avião no solo
- Fase 2: Rotação e Sustentação -> momento em que o avião rotaciona para sair do solo.
- Fase 3: Cruzeiro -> Avião voando na altitude de cruzeiro da referida rota.
- Fase 4: Aproximação -> Avião preparando para pouso.

- Fase 5: Pouso -> momento em que o avião toca o solo.

Para este estudo cada fase de voo representa a utilização de atuação de superfícies de comando de voo. A porcentagem da demanda máxima de cada atuador necessária para controlar a altitude de subida e descida da aeronave é representado na tabela 9 para o atuador de 1800 psi.

Tabela 9 – Demanda do Atuador de 1800 psi

pressão mínima [psi]	Peso [kg]	Atuador/usuário	Vazamento Interno	Atuador Max Fluxo (gpm)		Corrida para Descolagem	Rotação e Sustentação		Cruzeiro	Aproximação	Pouso
				EXT	RET		1	2			
1800	8,766	Aileron Esquerdo	0,195	1,220	1,220	10,00%	40,00%	3,20%	15,00%	30,00%	
1800	8,766	Aileron Direito	0,195	1,220	1,220	10,00%	40,00%	3,20%	15,00%	30,00%	
1800	10,300	Profundor Esquerdo	0,234	2,160	2,160	5,00%	20,00%	1,00%	5,00%	50,00%	
1800	10,300	Profundor Direito	0,234	2,160	2,160	5,00%	20,00%	1,00%	5,00%	50,00%	
1800	12,770	Leme	0,230	2,960	2,960	30,00%	45,00%	1,10%	10,00%	25,00%	

Fonte: Elaborado pelo autor

E para o atuador de 2000 psi, é representado pela tabela 10:

Tabela 10 – Demanda do Atuador de 2000 psi

pressão mínima [psi]	Peso [kg]	Atuador/usuário	Vazamento Interno	Atuador Max Fluxo (gpm)		Corrida para Descolagem	Rotação e Sustentação		Cruzeiro	Aproximação	Pouso
				EXT	RET		1	2			
2000	9,280	Aileron Esquerdo	0,290	0,640	0,640	10,00%	40,00%	3,20%	15,00%	30,00%	
2000	9,280	Aileron Direito	0,290	0,640	0,640	10,00%	40,00%	3,20%	15,00%	30,00%	
2000	9,650	Profundor Esquerdo	0,290	1,630	1,630	5,00%	20,00%	1,00%	5,00%	50,00%	
2000	9,650	Profundor Direito	0,290	1,630	1,630	5,00%	20,00%	1,00%	5,00%	50,00%	
2000	11,450	Leme	0,290	2,900	2,900	30,00%	45,00%	1,10%	10,00%	25,00%	

Fonte: Elaborado pelo autor

Isto significa que o cálculo é estático e não dinâmico e as tabelas 9 e 10 representam um ponto da máxima movimentação de cada superfície de comando em cada fase de voo representada na figura 12. Portanto a vazão máxima da bomba hidráulica por fase de voo será a somatória da porcentagem da vazão de cada atuador apresentado na tabela 11 e 12.

A coluna de “Vazamento Interno” nas tabelas 9 e 10, indicam a demanda em gpm que cada atuador possui para que o mesmo se mantenha na posição “zero”, ou seja, para que os atuadores vençam a força da gravidade mantendo eles na posição de não atuação. Já as colunas de “Atuador Max Fluxo (gpm)” mostram a demanda dos atuadores na extensão e retração dos mesmos.

4.2 CONFIGURAÇÃO DE COMANDO DE VOO

Conforme descrito no item 2.15, serão considerados duas configurações com atuadores diferentes, sendo a configuração 1 para os atuadores de 1800 psi, e a configuração 2 para os de 2000 psi. A tabela 11 abaixo mostra a substituição das porcentagens de demanda apresentados na tabela 9 para valores em gpm da configuração 1. O cálculo feito foi a multiplicação da vazão máxima de cada atuador para extensão e retração pela porcentagem definida na tabela 9, somando-se a metade do vazamento interno. Pode-se notar também, que as duas últimas linhas fazem a somatória total de demanda dos atuadores, podendo assim escolher uma bomba hidráulica que atenda a todos os casos de atuação. Para este caso, será utilizada uma bomba de 5,50 gpm com 14kg de peso.

Tabela 11 – Demanda em gpm da Configuração 1

Atuador/usuário	Corrida para Descolagem	Rotação e Sustentação	Cruzeiro	Aproximação	Pouso
	1	2	3	4	5
Aileron Esquerdo	0,220	0,586	0,137	0,281	0,464
Aileron Direito	0,220	0,586	0,137	0,281	0,464
Profundor Esquerdo	0,225	0,549	0,139	0,225	1,197
Profundor Direito	0,225	0,549	0,139	0,225	1,197
Leme	1,003	1,447	0,148	0,411	0,855
Fluxo Requerido pelo Sistema	1,892	3,716	0,698	1,422	4,176
Bomba Elétrica - Max Fluxo	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50

Fonte: Elaborado pelo autor

O anexo A mostra o gráfico do fluxo requerido pelo sistema em cada fase de voo com relação ao máximo fluxo gerado pela bomba para a configuração 1.

O mesmo foi feito para a configuração 2 agora utilizando a tabela 10. Neste caso a bomba utilizada será de vazão máxima de 4 gpm com peso de 9,5kg.

Tabela 12 – Demanda em GPM da Configuração 2

Atuador/usuário	Corrida para Descolagem	Rotação e Sustentação	Cruzeiro	Aproximação	Pouso
	1	2	3	4	5
Aileron Esquerdo	0,209	0,401	0,165	0,241	0,337
Aileron Direito	0,209	0,401	0,165	0,241	0,337
Profundor Esquerdo	0,227	0,471	0,161	0,227	0,960
Profundor Direito	0,227	0,471	0,161	0,227	0,960
Leme	1,015	1,450	0,177	0,435	0,870
Fluxo Requerido pelo Sistema	1,886	3,194	0,830	1,370	3,464
Bomba Elétrica - Max Fluxo	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Fonte: Elaborado pelo autor

O anexo B mostra o gráfico do fluxo requerido pelo sistema em cada fase de voo com relação ao máximo fluxo gerado pela bomba para a configuração 2.

4.3 DADOS DE ENTRADA

Para realizar os cálculos no Excel, foram criadas algumas tabelas para que os dados de entrada descritos nos itens anteriores, fossem inseridos. Todas as células na cor verde são dados de entrada e caso sejam alterados, todos os cálculos são automaticamente refeitos.

Analisando a arquitetura do sistema (Figura 11), temos os seguintes tubos com os seus respectivos comprimentos em milímetros, conforme tabela 13:

Tabela 13 – Comprimento dos Tubos

Tubo de Pressão	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Comprimento (mm)	1202	1128	18794	16279	14162	3128	3628	1598
Tubo de Retorno	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Comprimento (mm)	16361	13994	19601	3325	3578	1528	320	1629

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 14 mostra os dados do fluido e da bomba, sendo que apenas o da vazão máxima da bomba será alterado para comparar as duas configurações.

Tabela 14 – Dados do Fluido e da Bomba

Densidade do Fluido a -10°C		Viscosidade Cinemática a -10°C	Bomba	Vazão máx da Bomba
g/cm ³	kg/m ³	m ² /s	psi	gpm
1	1000	0,000074924	3000	4

Fonte: Elaborado pelo autor

Já a tabela 15, também foi criada baseada na arquitetura mostrada no item 2.21. Nela, são inseridos o valor da vazão de cada atuador conforme as tabelas 11 e 12 para cada fase de voo. Nas colunas “Dash” e “Material” são inseridos o diâmetro do tubo desejado e o tipo de material respectivamente, sendo eles “a” para alumínio, “t” para titânio e “c” para aço inox. A letra “c” para aço inox é derivada da sigla CRES que em inglês significa Corrosion Resistant Steel (Aço resistente à corrosão). Esta tabela faz a somatório de vazão por cada trecho de tubo, e verifica se a vazão para aquele diâmetro de tubo escolhido, esteja de acordo com a tabela 1 do item 2.12. Caso a vazão esteja acima do recomendado pela tabela 1, a célula de somatória fica em vermelho indicando que o diâmetro do tubo deve ser alterado.

Para um melhor entendimento de como deve ser feita a utilização da tabela 15, será mostrado um exemplo da escolha dos diâmetros dos tubos para a fase de voo 2 da configuração 1 através de 6 passos, sendo eles:

1º Passo: deve-se atribuir os valores das demandas dos atuadores na fase 2 da configuração 1 conforme tabela 11 no campo “vazão por atuador em gpm” e em seguida deixar todos os tubos com o diâmetro de 6,35mm (-4) para que o conjunto inicie com o menor peso possível.

A tabela 16 mostra como ficaria o preenchimento conforme o 1º passo.

Tabela 15 – Somatória de vazão por trecho

Vazão por Atuador em gpm										
0,209 0,209 0,227 0,2265 1,015										
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Ail. Direito	Ail. Esquerdo	Prof. Direito	Prof. Esquerdo	Leme	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5
P2	4	t	t-4	X	X	X	X	X	1,886	1,2
P3	4	t	t-4	X	X				0,418	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,209	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,209	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,2265	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,2265	1,2
P8	4	t	t-4					X	1,015	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,209	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,209	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,418	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,2265	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,2265	1,2
R6	4	a	a-4					X	1,015	1,2
R7	4	a	a-4	X	X	X	X	X	1,886	1,2
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – 1º Passo - Fase 2, configuração 1

Vazão por Atuador em gpm										
0,586 0,586 0,549 0,549 1,447										
Tubo	Dash	Material	Q1 (Ail. Direito)	Q2 (Ail. Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q	
P1	4	t	X	X	X	X	X	3,716	1,2	
P2	4	t	X	X	X	X	X	3,716	1,2	
P3	4	t	X	X				1,171	1,2	
P4	4	t		X				0,5855	1,2	
P5	4	t	X					0,5855	1,2	
P6	4	t				X		0,549	1,2	
P7	4	t			X			0,549	1,2	
P8	4	t					X	1,447	1,2	
R1	4	a		X				0,5855	1,2	
R2	4	a	X					0,5855	1,2	
R3	4	a	X	X				1,171	1,2	
R4	4	a				X		0,549	1,2	
R5	4	a			X			0,549	1,2	
R6	4	a					X	1,447	1,2	
R7	4	a	X	X	X	X	X	3,716	1,2	
R8	4	a	X	X	X	X	X	3,716	1,2	

Fonte: Elaborado pelo autor

2º Passo: aumentar os diâmetros dos tubos de cada trecho de modo que a coluna os valores da coluna “gpm do Trecho” sejam menor que a vazão máxima definida na tabela 1, indicando que todos estão passando no critério de vazão máxima por diâmetro de tubo.

A tabela 17 mostra como fica o preenchimento conforme 2º passo.

Tabela 17 – 2º Passo - Fase 2, configuração 1

			Vazão por Atuador em gpm						
			0,586	0,586	0,549	0,549	1,447		
Tubo	Das h	Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificado r de Vazão Q
P1	8	t	X	X	X	X	X	3,716	6
P2	8	t	X	X	X	X	X	3,716	6
P3	4	t	X	X				1,171	1,2
P4	4	t		X				0,5855	1,2
P5	4	t	X					0,5855	1,2
P6	4	t				X		0,549	1,2
P7	4	t			X			0,549	1,2
P8	6	t					X	1,447	3,5
R1	4	a		X				0,5855	1,2
R2	4	a	X					0,5855	1,2
R3	4	a	X	X				1,171	1,2
R4	4	a				X		0,549	1,2
R5	4	a			X			0,549	1,2
R6	6	a					X	1,447	3,5
R7	8	a	X	X	X	X	X	3,716	6
R8	8	a	X	X	X	X	X	3,716	6

Fonte: Elaborado pelo autor

Com estes dados atribuídos, a perda de carga por tubo é realizada automaticamente seguindo os passos descritos no item 3.1, calculando número de Reynolds, perda de carga em parte reta e assim por diante. A tabela 18 mostra como é feito o cálculo da perda de carga total dos tubos que alimentam o atuador do Aileron direito, porém para os outros atuadores é feito da mesma forma.

Tabela 18 – Cálculo da perda de carga por tubo

	Tubo	Material e Diâmetro	L		Q (gpm) (Vazão por Trecho)	< 2300	Psi	Perda de Carga em parte reta de tubo	Qtd de Curva de 90° (A cada 1 metro de tubo)	Perda de carga total em curvas (psi)	Perda de Carga Total (psi)
			Comprimento (mm)	Número de Reynolds (Re)							
Alçeron Direito	P1	T-8	1202	350	3,716	350	7,44	1	0,82	8,26	
	P2	T-8	1128	350	3,716	350	6,98	1	0,82	7,80	
	P3	T-4	18794	227	1,171	227	653,94	19	37,43	691,37	
	P5	T-4	14162	113	0,5855	113	246,38	14	10,82	257,20	
	R8	A-8	1629	365	3,716	365	11,88	2	1,95	13,83	
	R7	A-8	320	365	3,716	365	2,33	0	0,00	2,33	
	R3	A-4	19601	275	1,171	275	1467,35	20	87,66	1555,00	
	R2	A-4	13994	137	0,5855	137	523,80	14	24,07	547,87	

Fonte: Elaborado pelo autor

A perda de carga no filtro segue o item 3.3 e é calculada utilizando a fórmula 14. Já o reservatório hidráulico segue o item 2.20 que diz que a pressão interna adotada é de 80 psi. Por fim, a perda de carga na bomba é feita conforme o item 2.17, onde diz que a perda de carga não pode ultrapassar 5% do valor da vazão total, quando a mesma está operando em sua vazão máxima. Sendo assim a perda de carga em cada componente é concentrada em uma única tabela para ter uma visão geral de como está o sistema conforme mostra a tabela 19.

Tabela 19 – Perda de carga por componente

Tubo / Componente	Material e Diâmetro	Perda de carga Total (psi)
P1	T-8	8,26
P2	T-8	7,80
P3	T-4	691,37
P4	T-4	295,58
P5	T-4	257,20
P6	T-4	53,15
P7	T-4	62,02
P8	T-6	12,95
R1	A-4	639,91
R2	A-4	547,87
R3	A-4	1555,00
R4	A-4	121,43
R5	A-4	131,88
R6	A-6	18,52
R7	A-8	2,33
R8	A-8	13,83
Bomba Hidráulica	N/A	101,35
Filtro	N/A	8,52
Reservatório	N/A	80

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a perda de carga em cada tubo e componente, pode-se encontrar o valor da pressão disponível em cada atuador conforme item 3.6. A tabela 20, foi criada para mostrar esta pressão disponível, subtraindo todas as perdas do valor total de 3000 psi gerados pela bomba hidráulica. Nota-se que ela foi feita com base na tabela 6 do item 2.21, onde o nome dos tubos e dos componentes foram trocados pelas suas respectivas perdas de carga, podendo assim mostrar a pressão que estará disponível em cada atuador conforme a coluna “Pressão Disponível no Atuador (psi)”.

Tabela 20 – Pressão disponível no atuador

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	-282,07	101,35	8,26	8,52	7,80	691,37	257,20
		547,87	1555,00	2,33	8,52	13,83	80,00
Aileron Esquerdo	-412,48	101,35	8,26	8,52	7,80	691,37	295,58
		639,91	1555,00	2,33	8,52	13,83	80,00
Profundor Direito	2575,48	101,35	8,26	8,52	7,80	62,02	
		131,88	2,33	8,52	13,83	80,00	
Profundor Esquerdo	2594,80	101,35	8,26	8,52	7,80	53,15	
		121,43	2,33	8,52	13,83	80,00	
Leme	2737,91	101,35	8,26	8,52	7,80	12,95	
		18,52	2,33	8,52	13,83	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Por se tratar da configuração 1, existe uma necessidade de pressão mínima em cada atuador de 1800 psi, e como pode ser observado, ambos os atuadores dos ailerons não estão atendendo este critério, pois alguns tubos estão com uma perda de carga muito elevada. Neste caso, a pressão negativa nos ailerons significa que devido a grande perda de carga nas linhas, a bomba hidráulica não seria capaz de fornecer vazão para estes atuadores executarem os movimentos desejados. Para fazer os ajustes, é necessário seguir alguns outros passos até que o critério de 1800 psi seja atendido.

3º Passo: Aumentar o diâmetro do tubo de retorno que estiver com a maior perda de carga concentrada. Para este caso o tubo R3 com 1555 psi de perda deve aumentar.

4º Passo: Caso o 3º passo não satisfaça o critério de 1800 psi, o diâmetro dos próximos tubos de retorno que estiverem com a maior perda de carga devem ser aumentados. Para este caso os tubos R1 com 639,91 psi e o tubo R2 com 547,87 psi de perda de carga devem aumentar.

5º Passo: Se os passos anteriores não atenderem a pressão mínima no atuador, os tubos de pressão com maior perda de carga devem ser aumentados na mesma ordem, priorizando os que estiverem com a maior perda. Para este caso, o tubo P3 com 691,37 psi de perda de carga deve ser aumentado.

Priorizar o ajuste do diâmetro dos tubos de retorno ao invés dos de pressão, se dá ao fato de que o material utilizado nessas linhas é mais leve do que nas linhas de pressão, assim como descrito no item 2.13, sendo assim, aumentar o seu diâmetro é menos impactante levando em consideração o peso da aeronave e também é necessário atender o critério do 6º passo.

Por fim, o 6º passo deve ser observado, pois o tubo de retorno de um atuador deve ter um diâmetro igual ou maior do que a sua linha de pressão. Se isto ocorrer, a velocidade do fluido na linha de retorno será maior do que da linha de pressão pode fornecer, podendo gerar cavitação no atuador.

6º Passo: Verificar se o diâmetro do tubo de pressão na entrada do atuador está menor ou igual o diâmetro do tubo de retorno na saída do atuador.

Atendendo todos os passos descritos acima, o resultado da configuração 1 fase 2 deve ficar conforme as tabelas 21 (tubos) e 22 (pressão dos atuadores):

Tabela 21 – Resultado tubos fase 2, config. 1

Tubo	Dash	Material	Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
			0,586	0,586	0,549	0,549	1,447		
			Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	8	t	X	X	X	X	X	3,716	6
P2	8	t	X	X	X	X	X	3,716	6
P3	6	t	X	X				1,171	3,5
P4	4	t		X				0,5855	1,2
P5	4	t	X					0,5855	1,2
P6	4	t				X		0,549	1,2
P7	4	t			X			0,549	1,2
P8	6	t					X	1,447	3,5
R1	6	a		X				0,5855	3,5
R2	6	a	X					0,5855	3,5
R3	6	a	X	X				1,171	3,5
R4	4	a				X		0,549	1,2
R5	4	a			X			0,549	1,2
R6	6	a					X	1,447	3,5
R7	8	a	X	X	X	X	X	3,716	6
R8	8	a	X	X	X	X	X	3,716	6

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 22 – Pressão nos atuadores, fase2

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
		101,35	8,26	8,52	7,80	120,47	257,20
Aileron Direito	2138,77	65,73	187,20	2,33	8,52	13,83	80,00
		101,35	8,26	8,52	7,80	120,47	295,58
Aileron Esquerdo	2089,38	76,75	187,20	2,33	8,52	13,83	80,00
		101,35	8,26	8,52	7,80	62,02	
Profundor Direito	2575,48	131,88	2,33	8,52	13,83	80,00	
		101,35	8,26	8,52	7,80	53,15	
Profundor Esquerdo	2594,80	121,43	2,33	8,52	13,83	80,00	
		101,35	8,26	8,52	7,80	12,95	
Leme	2737,91	18,52	2,33	8,52	13,83	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS CONFIGURAÇÃO 1

5.1.1 Resultados por fase de voo

Para encontrar o melhor conjunto de tubos possível para a configuração 1, foram seguidos todos os passos apresentados no capítulo 4, calculando cada fase de voo descrita no item 4.1, iniciando os tubos pelo menor diâmetro e aumentando conforme a necessidade, utilizando os dados apresentados nas tabelas 11, 13 e 14.

As tabelas 23 à 32, mostram os melhores resultados obtidos em cada fase de voo:

Tabela 23 – Tubos fase 1

				Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificad or de Vazão Q
				0,2195	0,2195	0,225	0,225	1,003		
Tubo	Dash	Materi al	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,892	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,892	3,5
P3	4	t	t-4	X	X				0,439	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,2195	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,2195	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,225	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,225	1,2
P8	4	t	t-4					X	1,003	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,2195	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,2195	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,439	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,225	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,225	1,2
R6	4	a	a-4					X	1,003	1,2
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,892	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,892	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 24 – Pressão nos atuadores na fase 1

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2187,50	51,60	12,43	2,21	11,71	255,11	95,25
		202,77	68,73	4,59	2,21	25,89	80,00
Aileron Esquerdo	2139,15	51,60	12,43	2,21	11,71	255,11	109,46
		236,90	68,73	4,59	2,21	25,89	80,00
Profundor Direito	2730,90	51,60	12,43	2,21	11,71	25,11	
		53,36	4,59	2,21	25,89	80,00	
Profundor Esquerdo	2738,57	51,60	12,43	2,21	11,71	21,55	
		49,25	4,59	2,21	25,89	80,00	
Leme	2653,45	51,60	12,43	2,21	11,71	50,82	
		105,09	4,59	2,21	25,89	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Tubos fase 2

				Vazão por Atuador em gpm						
				0,5855	0,5855	0,549	0,549	1,447		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
P1	8	t	t-8	X	X	X	X	X	3,716	6
P2	8	t	t-8	X	X	X	X	X	3,716	6
P3	6	t	t-6	X	X				1,171	3,5
P4	4	t	t-4		X				0,5855	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,5855	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,549	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,549	1,2
P8	6	t	t-6					X	1,447	3,5
R1	6	a	a-6		X				0,5855	3,5
R2	6	a	a-6	X					0,5855	3,5
R3	6	a	a-6	X	X				1,171	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,549	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,549	1,2
R6	6	a	a-6					X	1,447	3,5
R7	8	a	a-8	X	X	X	X	X	3,716	6
R8	8	a	a-8	X	X	X	X	X	3,716	6

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 26 – Pressão nos atuadores na fase 2

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2138,77	101,35	8,26	8,52	7,80	120,47	257,20
		65,73	187,20	2,33	8,52	13,83	80,00
Aileron Esquerdo	2089,38	101,35	8,26	8,52	7,80	120,47	295,58
		76,75	187,20	2,33	8,52	13,83	80,00
Profundor Direito	2575,48	101,35	8,26	8,52	7,80	62,02	
		131,88	2,33	8,52	13,83	80,00	
Profundor Esquerdo	2594,80	101,35	8,26	8,52	7,80	53,15	
		121,43	2,33	8,52	13,83	80,00	
Leme	2737,91	101,35	8,26	8,52	7,80	12,95	
		18,52	2,33	8,52	13,83	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 27 – Tubos fase 3

Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
				Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
				0,1365	0,1365	0,1386	0,1386	0,1476		
P1	4	t	t-4	X	X	X	X	X	0,69784	1,2
P2	4	t	t-4	X	X	X	X	X	0,69784	1,2
P3	4	t	t-4	X	X				0,27308	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,13654	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,13654	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,1386	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,1386	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,14756	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,13654	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,13654	1,2
R3	4	a	a-4	X	X				0,27308	1,2
R4	4	a	a-4				X		0,1386	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,1386	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,14756	1,2
R7	4	a	a-4	X	X	X	X	X	0,69784	1,2
R8	4	a	a-4	X	X	X	X	X	0,69784	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 28 – Pressão nos atuadores na fase 3

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
		19,03	25,90	0,30	24,37	157,74	58,97
Aileron Direito	2062,08	125,52	354,47	14,28	0,30	77,03	80,00
		19,03	25,90	0,30	24,37	157,74	67,78
Aileron Esquerdo	2032,13	146,67	354,47	14,28	0,30	77,03	80,00
		19,03	25,90	0,30	24,37	15,38	
Profundor Direito	2710,72	32,69	14,28	0,30	77,03	80,00	
		19,03	25,90	0,30	24,37	13,21	
Profundor Esquerdo	2715,37	30,20	14,28	0,30	77,03	80,00	
		19,03	25,90	0,30	24,37	7,25	
Leme	2736,59	14,95	14,28	0,30	77,03	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29 – Tubos fase 4

				Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
				0,2805	0,2805	0,225	0,225	0,411		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,422	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,422	3,5
P3	4	t	t-4	X	X				0,561	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,2805	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,2805	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,225	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,225	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,411	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,2805	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,2805	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,561	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,225	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,225	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,411	1,2
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,422	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,422	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 30 – Pressão nos atuadores na fase 4

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2040,69	38,78	9,28	1,25	8,74	327,15	122,04
		259,85	88,24	3,45	1,25	19,28	80,00
Aileron Esquerdo	1978,75	38,78	9,28	1,25	8,74	327,15	140,26
		303,57	88,24	3,45	1,25	19,28	80,00
Profundor Direito	2759,51	38,78	9,28	1,25	8,74	25,11	
		53,36	3,45	1,25	19,28	80,00	
Profundor Esquerdo	2767,18	38,78	9,28	1,25	8,74	21,55	
		49,25	3,45	1,25	19,28	80,00	
Leme	2775,22	38,78	9,28	1,25	8,74	20,47	
		42,28	3,45	1,25	19,28	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 31 – Tubos fase 5

				Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
				0,4635	0,4635	1,197	1,197	0,855		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	8	t	t-8	X	X	X	X	X	4,176	6
P2	8	t	t-8	X	X	X	X	X	4,176	6
P3	6	t	t-6	X	X				0,927	3,5
P4	4	t	t-4		X				0,4635	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,4635	1,2
P6	4	t	t-4				X		1,197	1,2
P7	4	t	t-4			X			1,197	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,855	1,2
R1	6	a	a-6		X				0,4635	3,5
R2	6	a	a-6	X					0,4635	3,5
R3	6	a	a-6	X	X				0,927	3,5
R4	4	a	a-4				X		1,197	1,2
R5	4	a	a-4			X			1,197	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,855	1,2
R7	8	a	a-8	X	X	X	X	X	4,176	6
R8	8	a	a-8	X	X	X	X	X	4,176	6

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 32 – Pressão nos atuadores na fase 5

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perda de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2251,23	113,89	9,32	10,76	8,81	94,85	202,94
		51,81	147,37	2,62	10,76	15,63	80,00
Aileron Esquerdo	2212,25	113,89	9,32	10,76	8,81	94,85	233,22
		60,50	147,37	2,62	10,76	15,63	80,00
Profundor Direito	2319,18	113,89	9,32	10,76	8,81	137,16	
		291,86	2,62	10,76	15,63	80,00	
Profundor Esquerdo	2362,87	113,89	9,32	10,76	8,81	117,34	
		267,98	2,62	10,76	15,63	80,00	
Leme	2615,77	113,89	9,32	10,76	8,81	43,17	
		89,25	2,62	10,76	15,63	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.2 Resumo dos resultados obtidos

Mesclando os dados obtidos, a tabela 33 mostra um resumo da pressão que chega em cada atuador por fase de voo. A coluna “Pressão mínima” indica apenas a pressão mínima exigida em cada atuador.

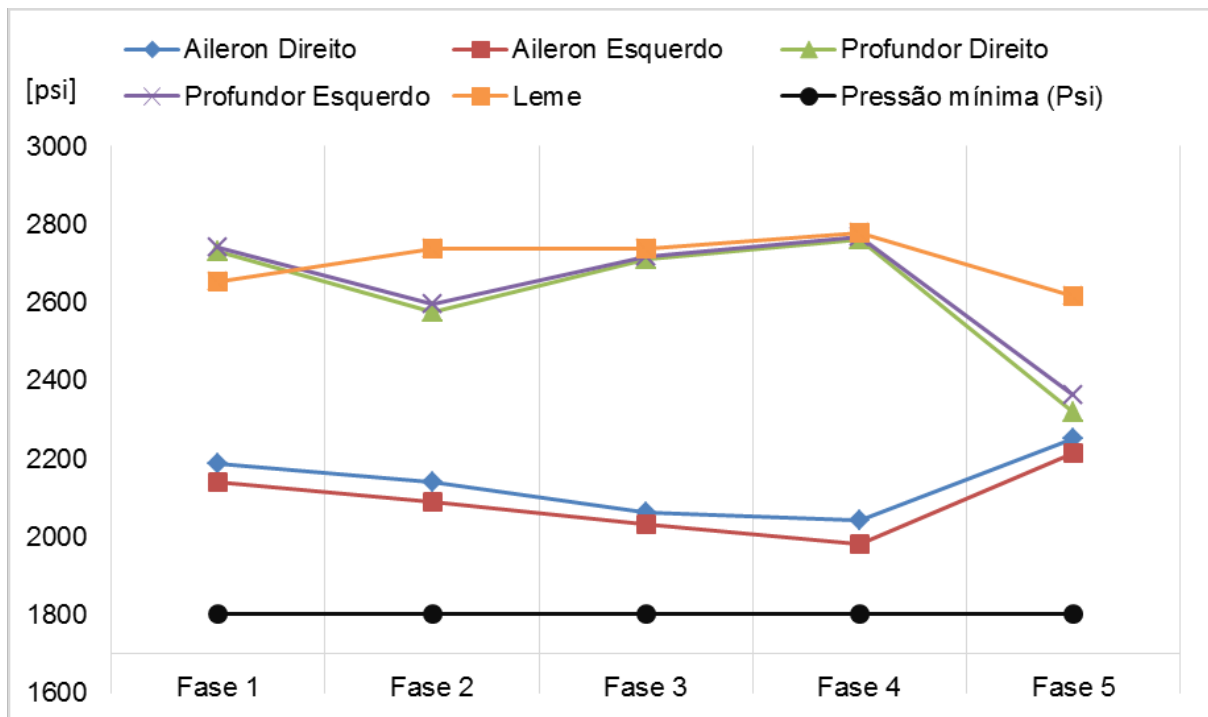
Tabela 33 – Pressão por atuador

Atuador	Pressão em psi nos Atuadores em cada fase de Voo					Pressão mínima (psi)
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
Aileron Direito	2187,50	2138,77	2062,08	2040,69	2251,23	1800
Aileron Esquerdo	2139,15	2089,38	2032,13	1978,75	2212,25	1800
Profundor Direito	2730,90	2575,48	2710,72	2759,51	2319,18	1800
Profundor Esquerdo	2738,57	2594,80	2715,37	2767,18	2362,87	1800
Leme	2653,45	2737,91	2736,59	2775,22	2615,77	1800

Fonte: Elaborado pelo autor

Através desta tabela, o gráfico ilustrado na figura 13 mostra que em qualquer fase de voo, e em qualquer situação de acionamento a pressão mínima (P mínimo) de 1800 psi sempre será respeitada.

Figura 13 – Gráfico de demanda por fase de voo, configuração 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada fase de voo foram obtidos um conjunto de diâmetros de tubos que atendesse da melhor forma possível a demanda dos atuadores utilizando o menor peso. Obviamente, somente um único conjunto de tubos pode ser instalado na aeronave, portanto para garantir o bom funcionamento do sistema, é necessário escolher o maior diâmetro de tubo definido em cada uma das fases chegando a uma configuração final conforme tabela 34.

Tabela 34 – Configuração final de tubos

Tubo	Melhor Configuração de Tubos por Fase de Voo (dash)					Config. Final
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Diâmetro Máximo (dash)
P1	6	8	4	6	8	8
P2	6	8	4	6	8	8
P3	4	6	4	4	6	6
P4	4	4	4	4	4	4
P5	4	4	4	4	4	4
P6	4	4	4	4	4	4
P7	4	4	4	4	4	4
P8	4	6	4	4	4	6
R1	4	6	4	4	6	6
R2	4	6	4	4	6	6
R3	6	6	4	6	6	6
R4	4	4	4	4	4	4
R5	4	4	4	4	4	4
R6	4	6	4	4	4	6
R7	6	8	4	6	8	8
R8	6	8	4	6	8	8

Fonte: Elaborado pelo autor

A coluna “Config. Final” mostra o maior diâmetro encontrado para o tubo em todas as fases, e são estes os diâmetros que serão utilizados para encontrar o peso do conjunto de tubos e que serão instalados na aeronave. A tabela 35, mostra como fica a pressão nos atuadores em todas as fases de voo utilizando a configuração final da tabela 34.

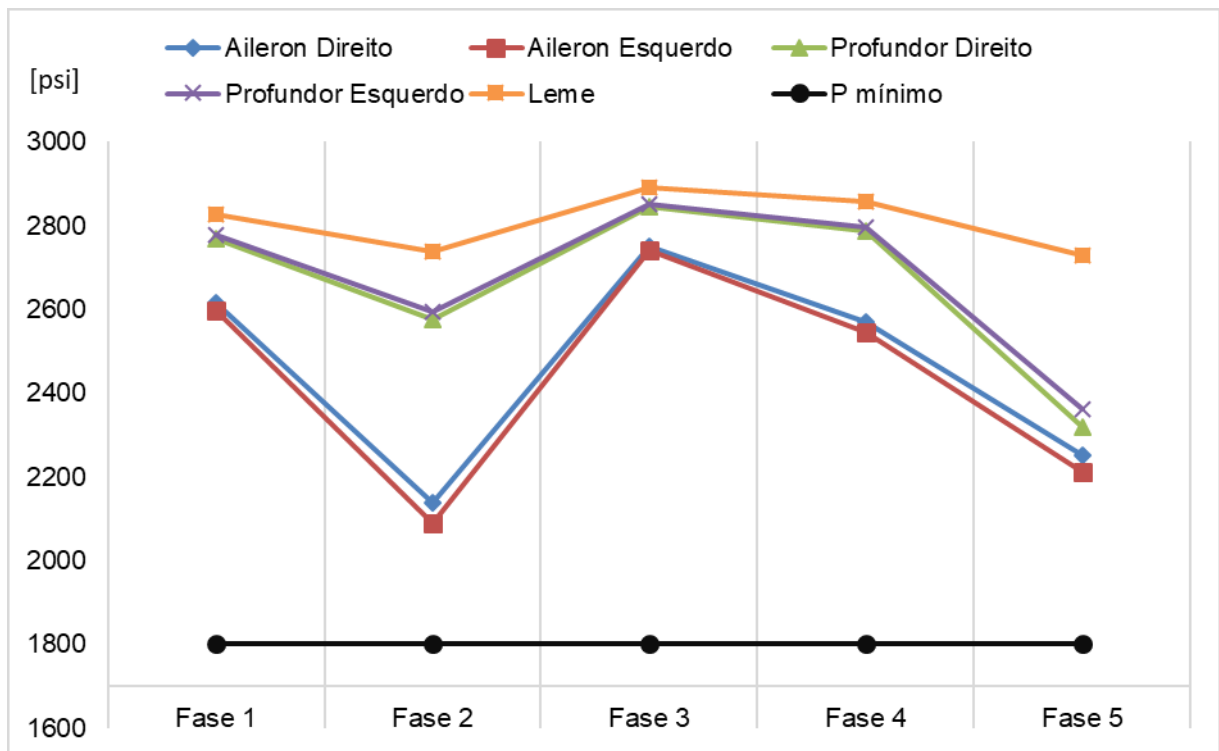
Tabela 35 – Pressão por atuador com configuração final

Atuador	Pressão em psi nos Atuadores em cada fase de Voo					Pressão mínima (psi)
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
Aileron Direito	2615,48	2138,77	2750,91	2568,60	2251,23	1800
Aileron Esquerdo	2597,18	2089,38	2739,59	2545,16	2212,25	1800
Profundor Direito	2769,49	2575,48	2846,54	2788,32	2319,18	1800
Profundor Esquerdo	2777,16	2594,80	2851,20	2795,99	2362,87	1800
Leme	2826,39	2737,91	2891,57	2858,14	2729,89	1800

Fonte: Elaborado pelo autor

Através desta tabela, o gráfico ilustrado na figura 14 mostra como fica o funcionamento em cada fase de voo utilizando a configuração de tubos final conforme a tabela 34.

Figura 14 – Gráfico de demanda por fase de voo com configuração 1 final



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.3 Peso da tubulação

Com a configuração final dos diâmetros dos tubos e seus comprimentos, o peso deles contendo fluido pode ser calculado conforme a tabela 36.

Tabela 36 – Peso da tubulação usando titânio

Tubo	Diâmetro (Dash)	Diâmetro (mm)	Material	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	Comprimento (mm)	Peso Total do Tubo (kg)
P1	8	12,7mm	Titânio	0,112	0,1017	0,2137	1202	0,26
P2	8	12,7mm	Titânio	0,112	0,1017	0,2137	1128	0,24
P3	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	18794	2,24
P4	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	16279	1,04
P5	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	14162	0,91
P6	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	3128	0,20
P7	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	3628	0,23
P8	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	1598	0,19
R1	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	16361	1,84
R2	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	13994	1,58
R3	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	19601	2,21
R4	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3325	0,19
R5	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3578	0,21
R6	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1528	0,17
R7	8	12,7mm	Alumínio	0,089	0,0937	0,1827	320	0,06
R8	8	12,7mm	Alumínio	0,089	0,0937	0,1827	1629	0,30
							Total (kg)	11,87

Fonte: Elaborado pelo autor

O cálculo é feito utilizando os dados de peso mostrados nas tabelas 2, 3 e 4 do item 2.13 que descrevem que cada tipo de material e de diâmetro possui um peso determinado por metro, sendo assim, este valor (Peso Total) foi multiplicado pelo comprimento de cada tubo e todos somados chegaram ao peso de 11,87 kilogramas.

Por aspecto de comparação a tabela 37 mostra qual seria a diferença de peso caso os tubos de alta pressão (P1 à P8) fossem trocados de titânio para aço inox (CRES).

Tabela 37 – Peso da tubulação usando aço inox

Tubo	Diâmetro (Dash)	Diâmetro (mm)	Material	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	Comprimento (mm)	Peso Total do Tubo (kg)
P1	8	12,7mm	Cres	0,1956	0,1017	0,2973	1202	0,36
P2	8	12,7mm	Cres	0,1956	0,1017	0,2973	1128	0,34
P3	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	18794	3,20
P4	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	16279	1,35
P5	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	14162	1,18
P6	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	3128	0,26
P7	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	3628	0,30
P8	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	1598	0,27
R1	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	16361	1,84
R2	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	13994	1,58
R3	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	19601	2,21
R4	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3325	0,19
R5	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3578	0,21
R6	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1528	0,17
R7	8	12,7mm	Alumínio	0,089	0,0937	0,1827	320	0,06
R8	8	12,7mm	Alumínio	0,089	0,0937	0,1827	1629	0,30
							Total (kg)	13,81

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que utilizando aço inoxidável nos tubos de pressão (P1 à P8), o conjunto de tubulação deixaria a aeronave aproximadamente 2 kilogramas mais pesado, o que para este estudo não é aceito, pois o critério era encontrar a configuração mais leve conforme objetivo do trabalho, item 1.1.

Neste estudo não está sendo levado em conta o custo da matéria-prima da tubulação e conforme descrito no item 2.13 o tubo de titânio tem um valor maior do que o tubo de aço inox. Em um estudo onde o peso e o custo fossem critérios de aceitação, o resultado poderia ser diferente. Todos os tubos de pressão poderiam ser de aço, ou uma combinação com os dois tipos de materiais em diâmetros diferentes.

5.1.4 Resultado final da configuração 1

Com a definição dos diâmetros e do peso dos tubos na tabela 36, somam-se o peso dos atuadores apresentados na tabela 9 do item 4.1 e da bomba hidráulica apresentado no item 4.2, chegando a um peso total de 76,77 kilogramas.

A tabela 38 apresenta o peso total do sistema considerando tubulação e equipamentos.

Tabela 38 – Configuração 1 final

Configuração 1				
Tubo	Diâmetro		Material	Peso do Sistema (kg)
P1	12,7mm	-8	Titânio	Bomba (5,5 gpm) 14
P2	12,7mm	-8	Titânio	Atuador Aileron Direito 8,766
P3	9,57mm	-6	Titânio	Atuador Aileron Esquerdo 8,766
P4	9,57mm	-4	Titânio	Atuador Profundor Esquerdo 10,300
P5	9,57mm	-4	Titânio	Atuador Profundor Direito 10,300
P6	6,35mm	-4	Titânio	Atuador Leme 12,770
P7	6,35mm	-4	Titânio	Tubulação config. Final 11,87
P8	9,57mm	-6	Titânio	Total = 76,77
R1	9,57mm	-6	Alumínio	
R2	6,35mm	-6	Alumínio	
R3	9,57mm	-6	Alumínio	
R4	6,35mm	-4	Alumínio	
R5	6,35mm	-4	Alumínio	
R6	9,57mm	-6	Alumínio	
R7	12,7mm	-8	Alumínio	
R8	12,7mm	-8	Alumínio	

Fonte: Elaborado pelo autor

O peso do reservatório e do filtro não foram considerados, pois o mesmo equipamento foi adotado para ambas as configurações, sendo assim a tabela 38 apresenta apenas o delta peso em relação aos componentes comuns do sistema e este peso será comparado com o delta peso da configuração 2.

5.2 RESULTADOS CONFIGURAÇÃO 2

5.2.1 Resultados por fase de voo

Para encontrar o melhor conjunto de tubos possível para a configuração 2, foram seguidos todos os passos apresentados no capítulo 4, calculando cada fase de voo descrita no item 4.1, iniciando os tubos pelo menor diâmetro e aumentando conforme a necessidade, utilizando os dados apresentados nas tabelas 12, 13 e 14.

As tabelas 39 à 48, mostram os melhores resultados obtidos em cada fase de voo:

Tabela 39 – Tubos fase 1

Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
				0,209	0,209	0,2265	0,2265	1,015		
				Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5
P3	4	t	t-4	X	X				0,418	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,209	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,209	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,2265	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,2265	1,2
P8	4	t	t-4					X	1,015	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,209	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,209	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,418	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,2265	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,2265	1,2
R6	4	a	a-4					X	1,015	1,2
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,886	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 40 – Pressão nos atuadores na fase 1

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perca de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2198,70	70,73	12,39	2,20	11,67	242,75	90,64
		192,97	65,39	4,57	2,20	25,81	80,00
Aileron Esquerdo	2152,69	70,73	12,39	2,20	11,67	242,75	104,17
		225,45	65,39	4,57	2,20	25,81	80,00
Profundor Direito	2711,45	70,73	12,39	2,20	11,67	25,27	
		53,72	4,57	2,20	25,81	80,00	
Profundor Esquerdo	2719,17	70,73	12,39	2,20	11,67	21,70	
		49,58	4,57	2,20	25,81	80,00	
Leme	2632,62	70,73	12,39	2,20	11,67	51,44	
		106,38	4,57	2,20	25,81	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 41 – Tubos fase 2

				Vazão por Atuador em gpm						
				0,401	0,401	0,471	0,471	1,45		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	3,194	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	3,194	3,5
P3	6	t	t-6	X	X				0,802	3,5
P4	4	t	t-4		X				0,401	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,401	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,471	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,471	1,2
P8	6	t	t-6					X	1,45	3,5
R1	6	a	a-6		X				0,401	3,5
R2	6	a	a-6	X					0,401	3,5
R3	6	a	a-6	X	X				0,802	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,471	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,471	1,2
R6	6	a	a-6					X	1,45	3,5
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	3,194	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	3,194	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 42 – Pressão nos atuadores na fase 2

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perca de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2265,17	119,78	21,26	6,30	20,06	81,80	175,24
		44,71	127,08	7,74	6,30	44,57	80,00
Aileron Esquerdo	2231,51	119,78	21,26	6,30	20,06	81,80	201,39
		52,21	127,08	7,74	6,30	44,57	80,00
Profundor Direito	2528,06	119,78	21,26	6,30	20,06	53,08	
		112,86	7,74	6,30	44,57	80,00	
Profundor Esquerdo	2544,53	119,78	21,26	6,30	20,06	45,51	
		103,96	7,74	6,30	44,57	80,00	
Leme	2662,46	119,78	21,26	6,30	20,06	12,98	
		18,56	7,74	6,30	44,57	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 43 – Tubos fase 3

				Vazão por Atuador em gpm					gpm do Trecho	Verificado de Vazão Q
				0,1655	0,1655	0,1613	0,1613	0,1769		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)		
P1	4	t	t-4	X	X	X	X	X	0,83046	1,2
P2	4	t	t-4	X	X	X	X	X	0,83046	1,2
P3	4	t	t-4	X	X				0,33096	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,16548	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,16548	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,1613	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,1613	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,1769	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,16548	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,16548	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,33096	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,1613	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,1613	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,1769	1,2
R7	4	a	a-4	X	X	X	X	X	0,83046	1,2
R8	4	a	a-4	X	X	X	X	X	0,83046	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 44 – Pressão nos atuadores na fase 3

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perca de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2251,85	31,14	30,90	0,43	29,07	191,62	71,60
		152,41	51,57	16,99	0,43	92,00	80,00
Aileron Esquerdo	2215,49	31,14	30,90	0,43	29,07	191,62	82,29
		178,08	51,57	16,99	0,43	92,00	80,00
Profundor Direito	2663,01	31,14	30,90	0,43	29,07	17,93	
		38,10	16,99	0,43	92,00	80,00	
Profundor Esquerdo	2668,46	31,14	30,90	0,43	29,07	15,40	
		35,19	16,99	0,43	92,00	80,00	
Leme	2692,38	31,14	30,90	0,43	29,07	8,71	
		17,96	16,99	0,43	92,00	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 45 – Tubos fase 4

				Vazão por Atuador em gpm						
				0,241	0,241	0,2265	0,2265	0,435		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,37	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	1,37	3,5
P3	4	t	t-4	X	X				0,482	1,2
P4	4	t	t-4		X				0,241	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,241	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,2265	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,2265	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,435	1,2
R1	4	a	a-4		X				0,241	1,2
R2	4	a	a-4	X					0,241	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,482	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,2265	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,2265	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,435	1,2
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,37	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	1,37	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 46 – Pressão nos atuadores na fase 4

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perca de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2143,48	51,38	8,93	1,16	8,42	280,46	104,68
		222,87	75,60	3,32	1,16	18,55	80,00
Aileron Esquerdo	2090,35	51,38	8,93	1,16	8,42	280,46	120,31
		260,37	75,60	3,32	1,16	18,55	80,00
Profundor Direito	2748,09	51,38	8,93	1,16	8,42	25,27	
		53,72	3,32	1,16	18,55	80,00	
Profundor Esquerdo	2755,81	51,38	8,93	1,16	8,42	21,70	
		49,58	3,32	1,16	18,55	80,00	
Leme	2760,60	51,38	8,93	1,16	8,42	21,69	
		44,79	3,32	1,16	18,55	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 47 – Tubos fase 5

				Vazão por Atuador em gpm						
				0,337	0,337	0,96	0,96	0,87		
Tubo	Dash	Material	Dash + Material	Q1 (Ail Direito)	Q2 (Ail Esquerdo)	Q3 (Prof. Direito)	Q4 (Prof. Esquerdo)	Q5 (Leme)	gpm do Trecho	Verificador de Vazão Q
P1	6	t	t-6	X	X	X	X	X	3,464	3,5
P2	6	t	t-6	X	X	X	X	X	3,464	3,5
P3	6	t	t-6	X	X				0,674	3,5
P4	4	t	t-4		X				0,337	1,2
P5	4	t	t-4	X					0,337	1,2
P6	4	t	t-4				X		0,96	1,2
P7	4	t	t-4			X			0,96	1,2
P8	4	t	t-4					X	0,87	1,2
R1	6	a	a-6		X				0,337	3,5
R2	4	a	a-4	X					0,337	1,2
R3	6	a	a-6	X	X				0,674	3,5
R4	4	a	a-4				X		0,96	1,2
R5	4	a	a-4			X			0,96	1,2
R6	4	a	a-4					X	0,87	1,2
R7	6	a	a-6	X	X	X	X	X	3,464	3,5
R8	6	a	a-6	X	X	X	X	X	3,464	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 48 – Pressão nos atuadores na fase 5

	Pressão Disponível no Atuador (psi)	Perca de carga por trecho de acionamento (psi)					
Aileron Direito	2038,72	129,90	23,11	7,41	21,81	68,50	146,95
		312,91	106,41	8,40	7,41	48,50	80,00
Aileron Esquerdo	2285,94	129,90	23,11	7,41	21,81	68,50	168,88
		43,76	106,41	8,40	7,41	48,50	80,00
Profundor Direito	2330,96	129,90	23,11	7,41	21,81	109,52	
		233,00	8,40	7,41	48,50	80,00	
Profundor Esquerdo	2365,61	129,90	23,11	7,41	21,81	93,75	
		214,12	8,40	7,41	48,50	80,00	
Leme	2538,67	129,90	23,11	7,41	21,81	43,95	
		90,85	8,40	7,41	48,50	80,00	

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Resumo dos resultados obtidos

Mesclando os dados obtidos, a tabela 49 mostra um resumo da pressão que chega em cada atuador por fase de voo. A coluna “P mínimo” indica apenas a pressão mínima exigida em cada atuador.

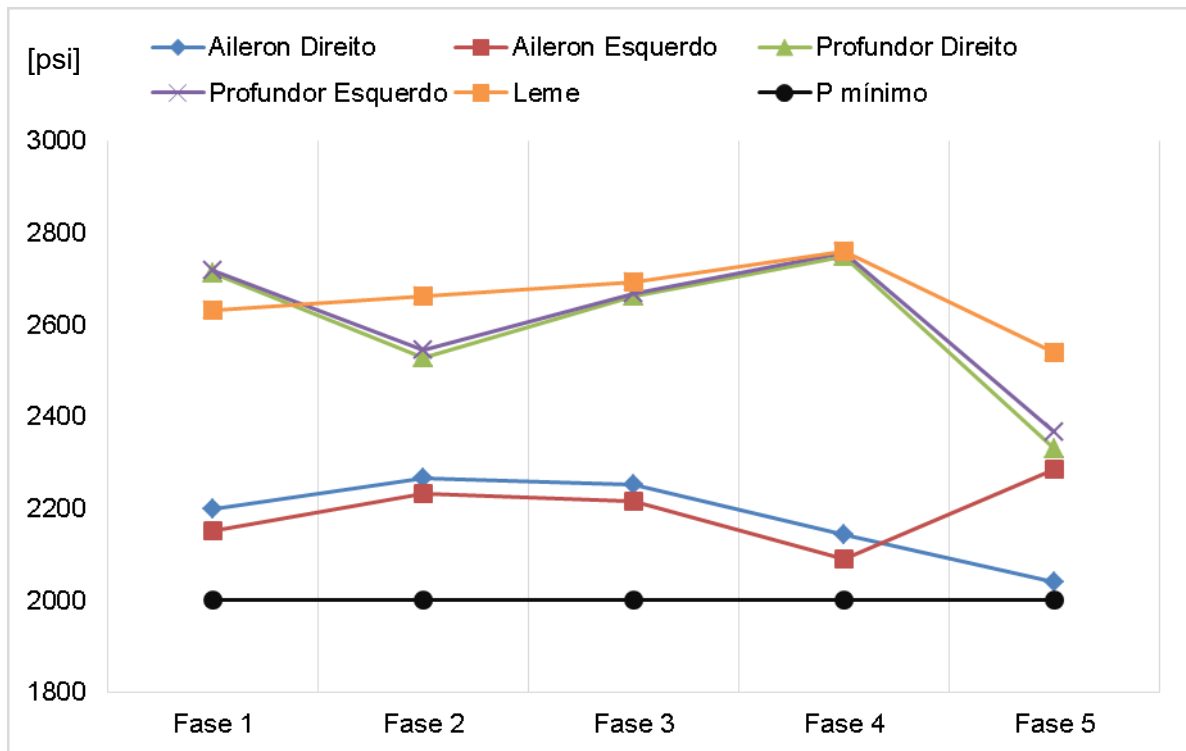
Tabela 49 – Pressão por atuador

Atuador	Pressão em psi nos Atuadores em cada fase de Voo					Pressão mínima (psi)
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
Aileron Direito	2198,70	2265,17	2251,85	2143,48	2038,72	2000
Aileron Esquerdo	2152,69	2231,51	2215,49	2090,35	2285,94	2000
Profundor Direito	2711,45	2528,06	2663,01	2748,09	2330,96	2000
Profundor Esquerdo	2719,17	2544,53	2668,46	2755,81	2365,61	2000
Leme	2632,62	2662,46	2692,38	2760,60	2538,67	2000

Fonte: Elaborado pelo autor

Através desta tabela, o gráfico ilustrado na figura 15 mostra que em qualquer fase de voo, e em qualquer situação de acionamento a pressão mínima (P mínimo) de 2000 psi sempre será respeitada.

Figura 15 – Gráfico de demanda por fase de voo, configuração 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada fase de voo foram obtidos um conjunto de diâmetros de tubos que atendesse da melhor forma possível a demanda dos atuadores utilizando o menor peso. Obviamente, somente um único conjunto de tubos pode ser instalado na aeronave, portanto para garantir o bom funcionamento do sistema, é necessário escolher o maior diâmetro de tubo definido em cada uma das fases chegando a uma configuração final conforme tabela 50.

Tabela 50 – Configuração final de tubos

Tubo	Melhor Configuração de Tubos por Fase de Voo (dash)					Config. Final
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Diâmetro Máximo (dash)
P1	6	6	4	6	6	6
P2	6	6	4	6	6	6
P3	4	6	4	4	6	6
P4	4	4	4	4	4	4
P5	4	4	4	4	4	4
P6	4	4	4	4	4	4
P7	4	4	4	4	4	4
P8	4	6	4	4	4	6
R1	4	6	4	4	6	6
R2	4	6	4	4	4	6
R3	6	6	6	6	6	6
R4	4	4	4	4	4	4
R5	4	4	4	4	4	4
R6	4	6	4	4	4	6
R7	6	6	4	6	6	6
R8	6	6	4	6	6	6

Fonte: Elaborado pelo autor

A coluna “Config. Final” mostra o maior diâmetro encontrado para o tubo em todas as fases, e são estes os diâmetros que serão utilizados para encontrar o peso do conjunto de tubos e que serão instalados na aeronave. A tabela 51, mostra como fica a pressão nos atuadores em todas as fases de voo utilizando a configuração final da tabela 50.

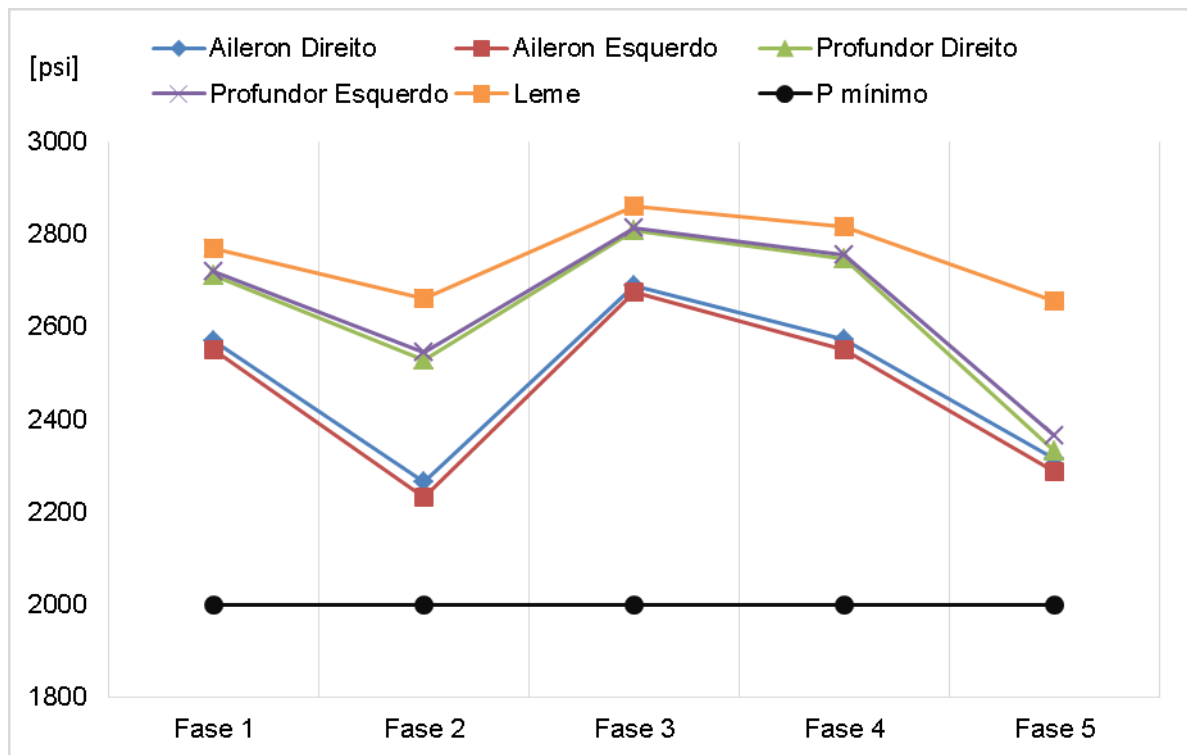
Tabela 51 – Pressão por atuador com configuração final

Atuador	Pressão em psi nos Atuadores em cada fase de Voo					Pressão mínima (psi)
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
Aileron Direito	2569,24	2265,17	2689,91	2571,49	2314,16	2000
Aileron Esquerdo	2551,83	2231,51	2676,16	2551,38	2285,94	2000
Profundor Direito	2711,45	2528,06	2808,46	2748,09	2330,96	2000
Profundor Esquerdo	2719,17	2544,53	2813,91	2755,81	2365,61	2000
Leme	2768,61	2662,46	2860,84	2817,93	2654,84	2000

Fonte: Elaborado pelo autor

Através desta tabela, o gráfico ilustrado na figura 16 mostra como fica o funcionamento em cada fase de voo utilizando a configuração de tubos final conforme a tabela 50.

Figura 16 – Gráfico de demanda por fase de voo com configuração 2 final



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Peso da tubulação

Com a configuração final dos diâmetros dos tubos e seus comprimentos, o peso deles contendo fluido pode ser calculado conforme a tabela 52.

Tabela 52 – Peso da tubulação usando titânio

Tubo	Diâmetro (Dash)	Diâmetro (mm)	Material	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	Comprimento (mm)	Peso Total do Tubo (kg)
P1	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	1202	0,14
P2	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	1128	0,13
P3	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	18794	2,24
P4	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	16279	1,04
P5	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	14162	0,91
P6	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	3128	0,20
P7	4	6,35mm	Titânio	0,04	0,0241	0,0641	3628	0,23
P8	6	9,57mm	Titânio	0,061	0,0582	0,1192	1598	0,19
R1	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	16361	1,84
R2	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	13994	1,58
R3	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	19601	2,21
R4	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3325	0,19
R5	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3578	0,21
R6	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1528	0,17
R7	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	320	0,04
R8	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1629	0,18
							Total (kg)	11,51

Fonte: Elaborado pelo autor

O calculo é feito utilizando os dados de peso mostrados nas tabelas 2, 3 e 4 do item 2.13 que descrevem que cada tipo de material e de diâmetro possui um peso determinado por metro, sendo assim, este valor (Peso Total) foi multiplicado pelo comprimento de cada tubo e todos somados chegaram ao peso de 11,51 kilogramas.

Por aspecto de comparação a tabela 53 mostra qual seria a diferença de peso caso os tubos de alta pressão (P1 à P8) fossem trocados de titânio para aço inox (CRES).

Tabela 53 – Peso da tubulação usando aço inox

Tubo	Diâmetro (Dash)	Diâmetro (mm)	Material	Peso do Tubo (kg/m)	Peso do Fluido (kg/m)	Peso total [kg/m]	Comprimento (mm)	Peso Total do Tubo (kg)
P1	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	1202	0,20
P2	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	1128	0,19
P3	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	18794	3,20
P4	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	16279	1,35
P5	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	14162	1,18
P6	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	3128	0,26
P7	4	6,35mm	Cres	0,059	0,0241	0,0831	3628	0,30
P8	6	9,57mm	Cres	0,1127	0,0575	0,1702	1598	0,27
R1	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	16361	1,84
R2	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	13994	1,58
R3	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	19601	2,21
R4	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3325	0,19
R5	4	6,35mm	Alumínio	0,041	0,0164	0,0574	3578	0,21
R6	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1528	0,17
R7	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	320	0,04
R8	6	9,57mm	Alumínio	0,065	0,0477	0,1127	1629	0,18
							Total (kg)	13,38

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que utilizando aço inoxidável nos tubos de pressão (P1 à P8), o conjunto de tubulação deixaria a aeronave aproximadamente 2 kilogramas mais pesado, o que para este estudo não é aceito, pois o critério era encontrar a configuração mais leve conforme objetivo do trabalho, item 1.1.

Neste estudo não está sendo levado em conta o custo da matéria-prima da tubulação e conforme descrito no item 2.13 o tubo de titânio tem um valor maior do que o tubo de aço inox. Em um estudo onde o peso e o custo fossem critérios de aceitação, o resultado poderia ser diferente. Todos os tubos de pressão poderiam ser de aço, ou uma combinação com os dois tipos de materiais em diâmetros diferentes.

5.2.4 Resultado final da configuração 2

Com a definição dos diâmetros e do peso dos tubos na tabela 52, somam-se o peso dos atuadores apresentados na tabela 10 do item 4.1 e da bomba hidráulica apresentado no item 4.2, chegando a um peso total de 76,77 kilogramas.

A tabela 38 apresenta o peso total do sistema considerando tubulação e equipamentos.

Tabela 54 – Configuração 2 final

Configuração 2				
Tubo	Diâmetro		Material	Peso do Sistema (kg)
P1	9,57mm	-6	Titânio	Bomba (4 gpm) 9,5
P2	9,57mm	-6	Titânio	Atuador Aileron Direito 9,280
P3	9,57mm	-6	Titânio	Atuador Aileron Esquerdo 9,280
P4	6,35mm	-4	Titânio	Atuador Profundor Esquerdo 9,650
P5	6,35mm	-4	Titânio	Atuador Profundor Direito 9,650
P6	6,35mm	-4	Titânio	Atuador Leme 11,450
P7	6,35mm	-4	Titânio	Tubulação config. Final 11,51
P8	9,57mm	-6	Titânio	Total = 70,32
R1	9,57mm	-6	Alumínio	
R2	9,57mm	-6	Alumínio	
R3	9,57mm	-6	Alumínio	
R4	6,35mm	-4	Alumínio	
R5	6,35mm	-4	Alumínio	
R6	9,57mm	-6	Alumínio	
R7	9,57mm	-6	Alumínio	
R8	9,57mm	-6	Alumínio	

Fonte: Elaborado pelo autor

O peso do reservatório e do filtro não foram considerados, pois o mesmo equipamento foi adotado para ambas as configurações, sendo assim a tabela 54 apresenta apenas o delta peso em relação aos componentes comuns do sistema para a configuração 2.

5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Comparando a tabela 38 (configuração 1 final) e a 54 (configuração 2 final), pode-se observar que o conjunto de tubos não ficou muito diferente, logo a diferença de peso apenas dos tubos foi muito pequena, visto que apenas quatro tubos na configuração 1 tiveram que ser de diâmetros maiores. Porém, como a configuração 2 possui um conjunto de atuadores e bomba mais leves, a diferença de peso entre as duas foi de 6,45 kilogramas.

Levando em consideração o critério de peso, fica evidente que a melhor escolha seria a configuração 2, porém tem outros fatores favoráveis nela.

Como descrito no item 1.2, tubos de maiores diâmetros são mais pesados, dificultam a montagem e manutenção e também ocupam mais espaço. Espaço é algo realmente crítico no desenvolvimento de aeronaves visto a quantidade de equipamentos que devem ser instalados, não só de hidráulica, mas de diversos outros sistemas como elétrica, propulsão e outros. Sendo assim, a configuração 2 além de ser mais leve, ocuparia menos espaço no avião, favorecendo também a montagem e colaborando com a instalação de outras tecnologias.

Observando os gráficos das figuras 14 e 16, pode-se concluir que em ambas as configurações finais, a pressão de trabalho fica sempre acima de 2000 psi, sendo assim, nas duas configurações tanto o atuador de 1800 psi, quanto o de 2000 psi poderiam ser instalados, mantendo a mesma bomba e os mesmos diâmetros de tubos conforme definidos. Uma pesquisa futura poderia fazer uma comparação de preço de todos os componentes, chegando a uma configuração mesclada que equilibraria o baixo peso com o baixo custo do sistema.

5.4 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

5.4.1 Ferramenta de comparação de configurações

Uma sugestão de continuidade para este trabalho seria de além do peso dos componentes que compõe o sistema, levantar também os custos e a confiabilidade de cada um, pois os equipamentos mais leves podem ser mais caros como é o caso do titânio para o aço inoxidável, mas também podem suportar menos ciclos de voo, precisando ser trocados com maior frequência. Todos estes fatores são determinantes para a escolha de implementação na aeronave. Em alguns casos, pode ser que o peso previsto para o avião na fase de projeto já tenha sido alcançado, portanto é preferível deixar o avião um pouco mais pesado e optar por peças mais baratas.

5.4.2 Incluir válvulas e conexões hidráulicas

Conforme mencionado no item 2.1, um sistema hidráulico é composto por diversas válvulas e não somente por atuadores, bombas, filtros e reservatórios. Além disso, é impossível instalar um tubo com um comprimento de mais de 19 metros em uma aeronave conforme mostrado na figura 11 do item 2.21. Este tubo teria que ser dividido em diversas partes e seriam unidos através de conexões hidráulicas, podendo elas serem retas, de 45° ou de 90° para permitir a montagem e manutenção das linhas. A quebra dos tubos permite também trabalhar melhor a vazão desejada nos atuadores, pois uma única linha poderia ter diversos diâmetros diferentes permitindo um melhor ajuste. Todas estas válvulas e conexões também geram perda de carga no fluido, e devem ser consideradas nos cálculos.

5.4.3 Dimensionamento de válvulas e atuadores

Como visto neste trabalho, a pressão de operação dos atuadores e seus pesos já estavam pré-definidos. O dimensionamento de uma válvula ou um atuador para ser instalados em um sistema hidráulico, leva em consideração diversos fatores, e o grande desafio é fazer um componente que seja robusto, leve, barato e que atenda às necessidades do cliente assim como suportar milhares de ciclos em uma aeronave. Portanto, a sugestão seria de desenvolver um trabalho de conjunto tubos + atuador, pois como visto na tabela 35 e 51, a pressão disponível ficou maior do que a exigida, sendo assim haveria margem para redução do atuador.

6 CONCLUSÃO

Conforme descrito no item 1.2, este trabalho comprova que os tubos de menores diâmetros podem afetar a performance devido a maior perda de carga, diminuindo o tempo de acionamento dos atuadores e conseqüentemente, não atendendo os requisitos. Já os tubos de maiores diâmetros são mais pesados, ocupam mais espaço, porém conduzem o fluido com menor perda de carga.

Todos os diâmetros de tubos adotados, assim como as suas características de peso, foram retirados de especificações padronizadas de acordo com o item 2.13, para garantir uma confiabilidade nos resultados dos pesos demonstrados no capítulo 5. A definição dos materiais de cada tubo também foi baseada no item 2.13, utilizando o alumínio para as linhas de baixa pressão e o titânio ou aço inox para os tubos de alta pressão.

As planilhas Excel, assim como todos os cálculos, foram desenvolvidos em função da arquitetura do sistema hidráulico apresentado na figura 11 do item 2.21, portanto qualquer alteração nesta arquitetura afetará e exigirá mudanças no Excel.

Alguns alertas foram criadas no Excel para garantir que nenhuma escolha de diâmetro de tubo ocasionasse o não cumprimento de alguma norma, como é o caso das células que ficam em vermelho caso o requisito de velocidade máxima do fluido dentro do tubo descrito no item 2.12, tabela 1, fosse ultrapassado, para atingir o critério de manter o fluxo em regime laminar.

Em ambas as configurações, foram utilizados tubos de titânio para as linhas de pressão para se alcançar o menor peso possível do sistema. Conforme descrito no item 2.13, o titânio é um material mais caro do que o aço inox, portanto fica a critério optar pelo menor peso, menor custo ou uma combinação de diâmetros. A diferença de peso entre utilizar tubos de aço inox e titânio podem ser observadas nas tabelas 36 e 37 para a configuração 1 e nas tabelas 52 e 53 para a configuração 2. Este estudo escolheu a configuração mais leve, pois o custo não fazia parte do estudo.

A configuração 1, apesar de utilizar atuadores de menor pressão mínima (1800 psi), exigiam uma vazão um pouco maior, e conseqüentemente uma bomba

mais robusta e pesada. Pode-se observar também que em algumas linhas foi necessário a implementação de tubos de diâmetros maiores do que na configuração 2. Todos estes fatores acabaram deixando a configuração 1 com um peso total de 76,77 kg contra os 70,32 kg da configuração 2.

A configuração 2, devido a demanda dos atuadores, permitiu a utilização de uma bomba mais leve e tubos de menores diâmetros. Conclui-se então que considerando apenas o fator peso, a melhor configuração a ser instalada na aeronave seria a configuração 2, com atuadores de pressão mínima de 2000 psi e uma bomba hidráulica de 4 gpm.

Estudos futuros, conforme descrito no item 5.4, podem mostrar que apesar da configuração 2 ser mais leve, ela pode ser uma solução muito mais cara do que a configuração 1, podendo assim, se descartada na escolha final.

REFERÊNCIAS

- AEROSPACE RECOMMEND PRACTICE. ARP 24 Rev. E: **Determination of Hydraulic Pressure Drop**, 2005.
- AIR 1922 Rev. A: **System Integration Factor That Affect Hydraulic Pump Life**, 2017.
- AIR 5005 Rev. A: **Commercial Aircraft Hydraulic Systems**, 2015.
- AIR FRANCE CARGO BOEING 747-400F, **Airplane-Pictures**. Disponível em: [<https://www.airplane-pictures.net/photo/45532/f-giue-air-france-cargo-boeing-747-400f/>](https://www.airplane-pictures.net/photo/45532/f-giue-air-france-cargo-boeing-747-400f/) Acesso em: 07 de novembro de 2017
- AMS 4945 Rev. F: **Titanium Alloy Tubing**, 2014.
- AMS 5561 Rev. G: **Steel, Corrosion and Heat-Resistant, High-Pressure Hydraulic**, 2012.
- AMS-T-7081 Rev A: **Tube, Aluminum Alloy, Seamless, Round, Drawn, 6061, Aircraft Hydraulic Quality**, 1999.
- ARP 4752 Rev. B: **Aerospace - Design and Installation of Commercial Transport Aircraft Hydraulic Systems**, 2013.
- ARP 994 Rev. A: **Recommended Practice for the Design of Tubing Installations for Aerospace Fluid Power Systems**, 2004.
- AS595 Rev. D: **Aerospace – Civil Type Variable Delivery, Pressure Compensated, Hydraulic Pump**, 2015.
- BRUNETTI, Franco, **Mecânica dos Fluidos**, Pearson Education, 2ª ed., 2008.
- EASA, **Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes**, 2017.
- EASTMAN, Skydroll, **Aviation Hydraulic Fluids**, 2018.
- FAA, **Hydraulic and Pneumatic Power Systems**, chapter 05 / 12, 2014.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluido**. 6ª ed. Rio de Janeiro – LTC, 2004. 795 p.
- HOMA, Jorge M. **Aerodinâmica e Teoria de Voo Noções Básicas**, Asa, 2017.

KELLER, George R. **Hydraulic System Analysis**, 1969.

LINSINGEN, Irlan von. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Florianópolis: Edufsc, 2001.

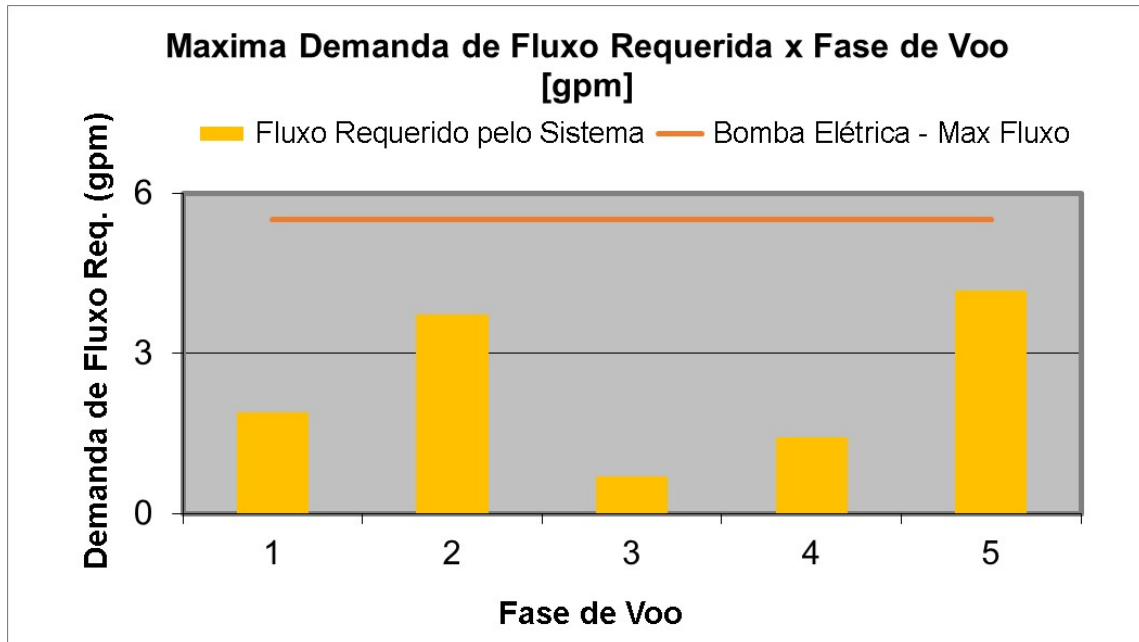
MASSEY, B. S. **Mecânica dos Fluidos**, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

NBR 8897: **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1985.

STOUT, Wayne. **Aerospace Hydraulic Systems**, 2013.

ANEXOS

ANEXO A – Gráfico do fluxo requerido em cada fase de voo x fluxo gerado pela bomba – configuração 1



ANEXO B – Gráfico do fluxo requerido em cada fase de voo x fluxo gerado pela bomba – configuração 2

