

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Thiago Torezim Silva

**Projeto e Análise do Sistema Hidráulico do Trem de
Pouso de um Aeronave**

São Carlos

2024

Thiago Torezim Silva

**Projeto e Análise do Sistema Hidráulico do Trem de
Pouso de um Aeronave**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

**São Carlos
2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).




S586p Silva, Thiago Torezim
Projeto e Análise do Sistema Hidráulico do Trem
de Pouso de um Aeronave / Thiago Torezim Silva;
orientador Jorge Henrique Bidinotto. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2024.

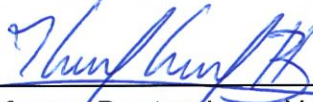
1. Trem de Pouso. 2. Sistema Hidráulico . 3.
Sistema de Acionamento. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Approval sheet

Candidato / Student: Thiago Torezim Silva
Título do TCC / Title : Projeto e Análise do Sistema Hidráulico do Trem de Pouso de um Aeronave
Data de defesa / Date: 22/11/2024

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / result
Professor Doutor Jorge Henrique Bidinotto 	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Professor Doutor João Paulo Eguea 	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Pesquisador Andre Luis Aguiar Paladini 	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee:



Professor Doutor Jorge Henrique Bidinotto
(assinatura / signature)

Este trabalho é dedicado aos alunos de graduação do Brasil, como uma contribuição para o desenvolvimento da engenharia nas universidades latino-americanas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar essa seção agradecendo à minha família, meu pai Valdinei da Silva, minha mãe Edilene Torezim Silva e meu irmão Felipe Torezim Silva, por serem os principais pilares que tive todos esses anos, pessoas em quem pude confiar e buscar suporte em toda a trajetória até chegar na universidade e dentro dela.

Aproveito aqui também para agradecer ao professor Jorge Henrique Bidinotto por todo o suporte durante o processo de desenvolvimento deste trabalho, além da compreensão pelos períodos de menos avanço, e pelo esforço de encaixar essa orientação em seu calendário.

Preciso citar também meus amigos de turma que tornaram esses 5 anos um período de muitas experiências incríveis. Assim também como meus amigos da República Viracopos, com quem dividi casa no ano de 2024, e que foram diretamente responsáveis por tornar o último ano de graduação, cheio de responsabilidades e preocupações, um dos anos mais leves até agora, mudando positivamente minha visão sobre a vida na cidade de São Carlos.

Não poderia deixar de fora também as pessoas com quem trabalhei durante meu período na área de Desenvolvimento Integrado de Produto do projeto E190F na Embraer. Rogério Barcelos Puerta, Ivar Pittan Azevedo, Luís Alfredo de Moraes e Artur da Costa Tachdjian, pessoas com quem aprendi demais não só sobre a parte técnica do trabalho, como também como ser uma pessoa melhor no ambiente de trabalho e fora dele.

“Pelo Corinthians, com muito amor, até o fim”
Gavião Louco

RESUMO

Silva, T. **Projeto e Análise do Sistema Hidráulico do Trem de Pouso**. 2024. 70p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Este Trabalho de Conclusão de Curso visa o desenvolvimento de um projeto hidráulico destinado ao trem de pouso de uma aeronave, abrangendo as pernas do trem de pouso principal e a bequilha. O objetivo principal é a concepção de um sistema hidráulico que seja eficiente e seguro, e que cumpra com as exigências operacionais e normativas de segurança da aviação. A metodologia adotada envolve a modelagem e análise do sistema, bem como a realização de simulações para a avaliação do desempenho. Os resultados obtidos demonstram que o projeto satisfaz as especificações requeridas, apresentando um sistema caracterizado por alta eficiência e confiabilidade. As conclusões enfatizam a relevância de um projeto diretamente estruturado para a segurança e eficácia do trem de pouso em suas operações.

Palavras-chave: Trem de Pouso. Sistemas Hidráulicos. Sistema de Acionamentos.

ABSTRACT

Silva, T. **Design and Analysis of the Hydraulic System of an Aircraft Landing Gear**. 2024. 70p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

This Thesis aims to develop a hydraulic design intended for an aircraft's landing gear, covering the main landing gear and the nose landing gear. The main objective is to conceive a hydraulic system that is efficient and safe, meeting the operational and regulatory aviation safety requirements. The adopted methodology involves the modeling and analysis of the system, as well as conducting simulations to evaluate performance. The results obtained demonstrate that the project meets the required specifications, presenting a system characterized by high efficiency and reliability. The conclusions emphasize the relevance of a design directly structured for the safety and effectiveness of the landing gear in its operations.

Keywords: Landing-Gear, Hidraulic Systems, Drive Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – CAD da Aeronave desenvolvida na disciplina de Projetos de Aeronaves I (SAA0200).	26
Figura 2 – Curtiss Triad Airplane	29
Figura 3 – Boeing Monomail	30
Figura 4 – E190F - Trem de Pouso Triciclo	31
Figura 5 – Cessna 150 - Trem de Pouso Convencional	32
Figura 6 – Bomba de Pistões Axiais	34
Figura 7 – Bomba de Pistões Axiais	35
Figura 8 – Atuador Mecânico-Hidráulico	36
Figura 9 – Válvula de Retenção Unidirecional	37
Figura 10 – Sistema de Alimentação modelado no software <i>Hopsan</i>	42
Figura 11 – Sistema de Acionamento modelado no software <i>Hopsan</i>	43
Figura 12 – Sistema de Lógica da Porta modelado no software <i>Hopsan</i>	46
Figura 13 – Sistema de Lógica da Perna do Trem de Pouso modelado no software <i>Hopsan</i>	48
Figura 14 – Sistema de Alimentação com Redundância modelado no software <i>Hopsan</i>	49
Figura 15 – Funcionamento do Conjunto Bequilha-Porta.	51
Figura 16 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Direito.	53
Figura 17 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Esquerdo.	53
Figura 18 – Comparação entre as vazões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação.	55
Figura 19 – Comparação entre as pressões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação.	55
Figura 20 – Comparação entre as vazões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação com a válvula principal falhada.	56
Figura 21 – Comparação entre as pressões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação com a válvula principal falhada.	57
Figura 22 – Funcionamento do Conjunto Bequilha-Porta com sistema de alimentação redundante.	58
Figura 23 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Direito com sistema de alimentação redundante.	59
Figura 24 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Esquerdo com sistema de alimentação redundante.	59
Figura 25 – Modelo completo desenvolvido no software <i>Hopsan</i>	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições dos parâmetros utilizados	40
Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizados - Alimentação	42
Tabela 3 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Pernas Trem de Pouso Principal	44
Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Portas Trem de Pouso Principal	45
Tabela 5 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Bequilha	45
Tabela 6 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Porta da Bequilha	45
Tabela 7 – Sinais Lógicos do Sistema de Acionamento da Porta	47
Tabela 8 – Tempos de Operação Conjunto Porta-Bequilha	52
Tabela 9 – Tempos de Operação Conjunto Trem de Pouso Principal	54
Tabela 10 – Tempos de Funcionamento Conjunto Bequilha-Porta com Bomba Principal Falhada	58
Tabela 11 – Tempos de Funcionamento Conjunto Porta-Trem de Pouso Principal com Bomba Principal Falhada	60
Tabela 12 – Valores Típicos para a Razão de Peso de Pouso para Peso de Decolagem	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USP	Universidade de São Paulo
USPSC	Campus USP de São Carlos

LISTA DE SÍMBOLOS

W_{TO}	Peso de decolagem
W_L	Peso de Pouso de Projeto
n_{ult}	Fator de Carga Ultimate para Pouso
l_{sm}	Comprimento do amortecedor para o trem de pouso principal
l_{sn}	Comprimento do amortecedor para o trem de pouso do nariz
n_p	Velocidade Angular da Bomba Hidráulica
D_p	Deslocamento da Bomba Hidráulica
p_{max}	Pressão máxima de Abertura
V	Volume
A	Área
m	Massa
F	Força
t	instante de tempo t
Δt	intervalo de tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivo	26
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	29
2.1	Trem de Pouso	29
2.1.1	Sub-partes de um Trem de Pouso	30
2.2	Componentes Hidráulicos do Sistema	32
2.2.1	Bomba Hidráulica	33
2.2.2	Acumuladores	35
2.2.3	Atuadores	35
2.2.4	Válvulas	36
2.3	Software Utilizado - Hopsan	37
2.3.1	Método de Linhas de Transmissão (TLM)	37
2.3.2	Modelagem de Componentes	38
2.3.3	Aplicações e Vantagens	38
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	Estimativa de Massa do Trem de Pouso	39
3.1.1	Cessna Method - Roskam	39
3.1.2	Método GD	40
3.2	Desenvolvimento do Modelo	41
3.2.1	Sistema de Alimentação	41
3.2.2	Sistema de Acionamento	43
3.2.3	Sistema de Lógica de Funcionamento	45
3.2.3.1	Lógica da Porta	45
3.2.3.2	Lógica da Perna do Trem de Pouso	47
3.2.4	Integração dos Sistemas	48
3.2.5	Adição de Redundância	48
4	ANÁLISES E RESULTADOS	51
4.1	Funcionamento do Sistema	51
4.1.1	Conjunto Porta-Bequilha	51
4.1.2	Conjunto Porta-Perna Trem de Pouso Principal	52
4.2	Análise de Funcionamento do Sistema de Alimentação Redundante	54
4.2.1	Falha na Bomba Principal	56
5	CONCLUSÃO	61

REFERÊNCIAS	63
APÊNDICES	65
APÊNDICE A – TABELA DE W_L - ROSKAM	67
APÊNDICE B – MODELO HIDRÁULICO COMPLETO	69

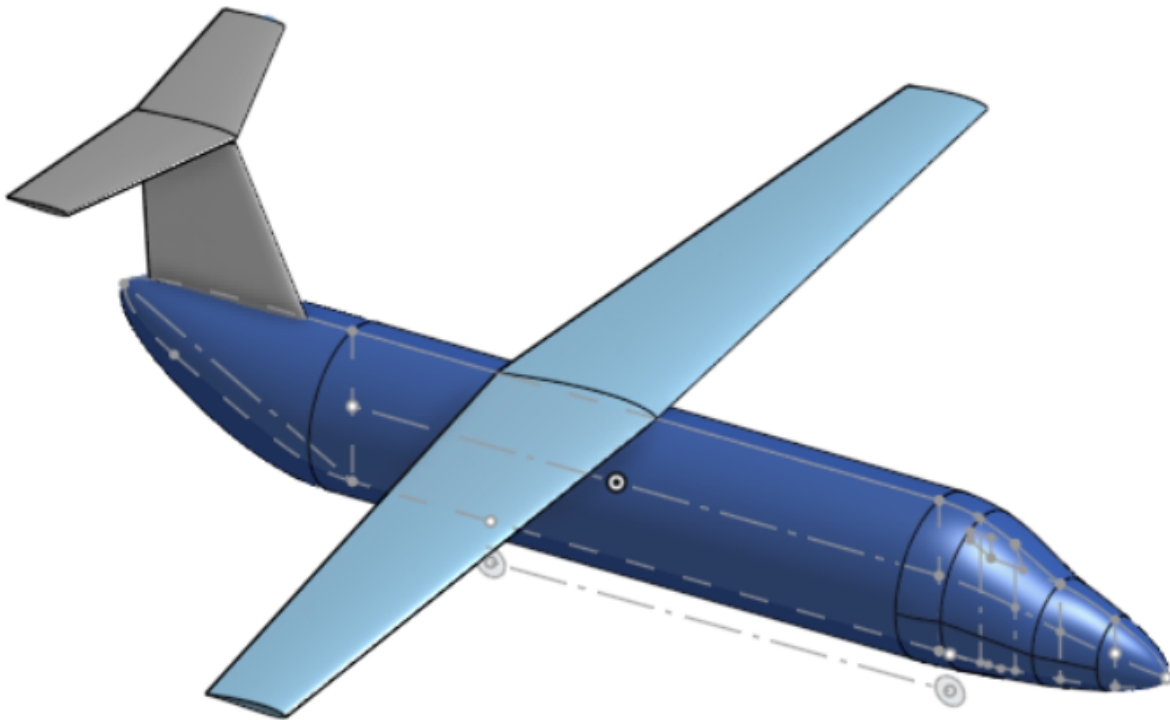
1 INTRODUÇÃO

Este trabalho está diretamente vinculado ao desenvolvimento da aeronave projetada nas disciplinas de Projeto de Aeronaves I (SAA0200) e Projeto de Aeronaves II (SAA0201), onde os principais dados da aeronave, como peso, dimensões e configurações gerais, foram estabelecidos. A partir dessas informações, foi possível projetar o sistema hidráulico do trem de pouso, considerando as especificidades da aeronave em questão. Essas disciplinas fornecem a base teórica e prática para a concepção de componentes críticos, como o trem de pouso, e permitem a integração entre diferentes sistemas da aeronave, garantindo que o projeto final atenda aos requisitos necessários.

Nestas disciplinas foi desenvolvido um avião cargueiro com objetivo de homologação sob a FAR23, de modo que as principais definições de peso e velocidades, e consequentemente dimensionamento de superfícies, fuselagem e interiores foram guiados por este documento. Além disso, foi definida como missão da aeronave que esta fosse capaz de transportar mercadorias (sejam essas de entregas comerciais ou de programas de ajuda humanitária) para as regiões mais remotas do Brasil e de países próximos da América do Sul, sendo capaz de pousar em pistas de baixa qualidade e com pouco suporte infraestrutural.

É válido destacar que esta aeronave possui um *MTOW* de 8600 *kg*, uma velocidade máxima de 210 *kts*, um *flight level* ideal de 18000 *ft*, tendo um distância de decolagem de 723 *m* e uma de pouso de 764 *m*.

Figura 1 – CAD da Aeronave desenvolvida na disciplina de Projetos de Aeronaves I (SAA0200).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o projeto, portanto, levou-se em conta que o trem de pouso é um dos principais componentes de uma aeronave, responsável por absorver o impacto durante as operações de pouso e decolagem, além de proporcionar suporte à aeronave enquanto está em solo. Ele desempenha funções essenciais, como o amortecimento das cargas durante o pouso e a capacidade de operar em diferentes tipos de superfície. Além disso, O sistema hidráulico é amplamente utilizado no controle do trem de pouso, garantindo precisão nos movimentos de retração e extensão das pernas e de suas portas de proteção, além de assegurar a confiabilidade operacional.

O desenvolvimento de sistemas hidráulicos para aviação exige uma compreensão aprofundada das normas e especificações técnicas estabelecidas por órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Federal Aviation Administration (FAA). Esses sistemas devem atender a rigorosos padrões de segurança, incluindo requisitos de redundância, confiabilidade e resistência a falhas.

1.1 Objetivo

Desta forma, este trabalho focará no desenvolvimento do projeto hidráulico do sistema de trem de pouso utilizando o software Hopsan, uma ferramenta amplamente empregada para a simulação de sistemas hidráulicos. Através do Hopsan, será possível

modelar os principais componentes do sistema, como atuadores, válvulas e tubulações, além de integrar a lógica de controle necessária para a operação do trem de pouso. Ademais, serão realizadas análises detalhadas de funcionamento do sistema em diferentes condições operacionais, bem como estudos de falhas, visando identificar potenciais vulnerabilidades e propor soluções para aumentar a confiabilidade e segurança do sistema.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Trem de Pouso

O trem de pouso é um sistema fundamental em uma aeronave, responsável por proporcionar suporte durante as fases de decolagem, pouso e movimentação no solo. Sua função principal é absorver o impacto do pouso, distribuindo o peso da aeronave e protegendo sua estrutura. Além disso, o trem de pouso garante estabilidade e controle direcional enquanto a aeronave está em solo, permitindo operações em diferentes tipos de pista e sob variações de carga.

A evolução dos trens de pouso na história da aviação reflete os avanços tecnológicos e as crescentes demandas de eficiência e desempenho das aeronaves. Nos primórdios da aviação, os trens de pouso eram fixos e compostos por rodas simples ou esquis, projetados para facilitar decolagens e pousos em superfícies irregulares. Esse design simples era funcional, mas gerava alto arrasto aerodinâmico, limitando a eficiência durante a operação.

Um marco inicial importante foi o Curtiss Triad Airplane (figura 2), em 1911, que introduziu um sistema rudimentar de trem de pouso retrátil. Apesar de manual, ele possibilitava que o avião operasse tanto em terra quanto na água, sendo pioneiro na integração de maior flexibilidade operacional com redução de arrasto.

Figura 2 – Curtiss Triad Airplane



Fonte: <https://www.history.navy.mil/content/history/museums/nnam/explore/collections/aircraft/a/a-1-triad0.html>

Décadas depois, em 1933, o Boeing Monomail (figura 3) elevou o conceito de trem de pouso retrátil a um novo patamar. Este avião foi projetado com um sistema retrátil mais avançado, acionado mecanicamente, que representou uma revolução ao melhorar significativamente a aerodinâmica da aeronave. Essa inovação não apenas aumentou a eficiência no voo, mas também influenciou o design das aeronaves modernas, consolidando o uso de trens de pouso retráteis como padrão na aviação.

Figura 3 – Boeing Monomail



Fonte: <https://secure.boeingimages.com/archive/Model-221-Monomail-2F3XC5NBIAM.html>

Esses avanços destacam como as inovações nos trens de pouso foram cruciais para melhorar o desempenho e expandir as capacidades da aviação ao longo do tempo.

2.1.1 Sub-partes de um Trem de Pouso

- **Estruturas de Suporte (Pernas do Trem de Pouso):** São os elementos que conectam as rodas à fuselagem da aeronave. Estas estruturas podem ser rígidas ou retráteis, dependendo do tipo de aeronave. Nos sistemas retráteis, as pernas do trem de pouso se recolhem durante o voo para reduzir o arrasto aerodinâmico.
- **Amortecedores:** Componentes críticos que absorvem o impacto durante o pouso. Eles são, em geral, do tipo óleo-pneumático, combinando óleo hidráulico e gás comprimido para dissipar a energia do impacto e garantir um pouso suave.
- **Rodas e Pneus:** Suportam o peso da aeronave e proporcionam a tração necessária para o taxiamento, decolagem e frenagem. Os pneus são especialmente reforçados

para resistir a altos impactos e à fricção em alta velocidade.

- **Freios:** Localizados nas rodas do trem de pouso principal, os freios são fundamentais para desacelerar a aeronave após o pouso e durante o taxiamento. Os sistemas de freios podem ser hidráulicos, pneumáticos ou elétricos, dependendo da aeronave (MOIR; SEABRIDGE, 2008).
- **Sistema de Estabilidade e Direção:** Nas aeronaves com trem de pouso em configuração triciclo (duas pernas principais e uma dianteira), o trem dianteiro é equipado com um sistema de direção para manobras em solo, permitindo que a aeronave gire e seja controlada em diferentes direções enquanto taxiando (MOIR; SEABRIDGE, 2008).

Os Trem de Pouso podem ter variações quanto a sua configuração:

- **Trem de Pouso Triciclo:** É a configuração mais comum, com duas pernas principais localizadas sob as asas ou fuselagem e uma perna dianteira para direção (figura 4). Esta configuração melhora a visibilidade do piloto durante o taxiamento e pouso, além de proporcionar maior estabilidade ao solo.

Figura 4 – E190F - Trem de Pouso Triciclo



Fonte: <https://djsaviation.net/emrbaer-enters-new-era-with-e190f/>

- **Trem de Pouso Convencional:** Nesse tipo de configuração, duas rodas principais estão localizadas na frente, e uma pequena roda ou esqui na cauda da aeronave (figura

5). Era comum em aviões antigos, sendo sua desvantagem é a menor estabilidade ao solo.

Figura 5 – Cessna 150 - Trem de Pouso Convencional



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Conventional_landing_gear#/media/File:Cessna150taildraggerC-GOCB02.jpg

E também variações quanto a sua fixação:

- **Trem de Pouso Retrátil:** Utilizado em aeronaves mais novas para reduzir o arrasto durante o voo. As pernas do trem de pouso são recolhidas para dentro da fuselagem ou asas após a decolagem.
- **Trem de Pouso Fixo:** Comum em aeronaves de pequeno porte e mais simples, onde o trem de pouso não se retrai, proporcionando simplicidade e menos peso mecânico, mas gerando maior arrasto.

2.2 Componentes Hidráulicos do Sistema

A estrutura básica de um circuito hidráulico consiste em componentes que permitem a transmissão de energia e movimento através de fluidos pressurizados. Um sistema hidráulico é tipicamente composto por:

- Sistema de alimentação: Bombas, Reservatórios, etc;

- Elementos de Controle: Válvulas direcionais e de alívio de pressão, Sensores, etc;
- Elementos de Transmissão: Linhas hidráulicas;
- Outros Elementos: Medidores, Acumuladores, Atuadores, etc.

Esses componentes trabalham em conjunto para fornecer potência e controle, garantindo que as superfícies de controle da aeronave, o trem de pouso e outros sistemas operem conforme projetado.

2.2.1 Bomba Hidráulica

As bombas hidráulicas são responsáveis por transformar a energia mecânica de um motor em energia hidráulica, fornecendo a pressão necessária para movimentar atuadores e outros dispositivos. Elas podem ser alimentadas por motores elétricos, motores a combustão, ou até mesmo pela caixa de engrenagens do motor da aeronave (MOIR; SEABRIDGE, 2008).

Essas se dividem em dois grupos principais: hidrodinâmicas e hidrostáticas. Bombas hidrodinâmicas utilizam a energia cinética do fluido para gerar movimento e são conhecidas por operarem com baixa pressão e grandes volumes. Já as bombas hidrostáticas são projetadas para operar em alta pressão e independem da velocidade do fluido, sendo adequadas para sistemas aeronáuticos devido à sua alta eficiência.

Dentro das bombas hidrostáticas, existe a classificação por tipo de deslocamento, que pode ser fixo ou variável. Bombas de deslocamento fixo, como as de engrenagens, parafusos ou palhetas, fornecem uma vazão constante, sendo de baixo custo e capazes de operar com fluidos de diferentes viscosidades. Já as bombas de deslocamento variável, comumente de pistões axiais, ajustam automaticamente a vazão de acordo com a demanda do sistema, proporcionando maior controle e economia de energia.

Bombas de engrenagens são frequentemente utilizadas em aeronaves menores devido à sua simplicidade e confiabilidade. Elas consistem em dois conjuntos de engrenagens que giram em sentidos opostos, com uma das engrenagens conectada a uma fonte de movimento. Seu principal benefício é a capacidade de operar em uma ampla gama de viscosidades e rotações, embora a pressão gerada seja limitada.

Bombas de parafusos, por sua vez, utilizam fusos helicoidais que movem o fluido ao longo de um esqueleto, aumentando aos poucos a pressão do fluido. Essas bombas são conhecidas por seu baixo nível de ruído e por gerarem vazões suaves e contínuos, sendo indicadas para operações em alta pressão.

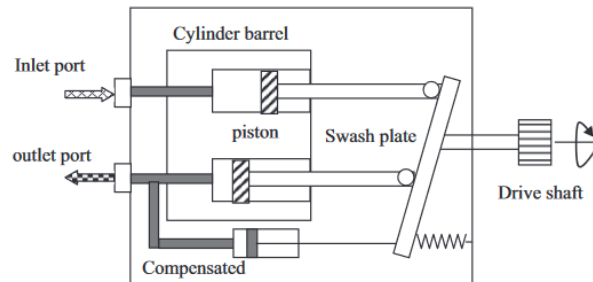
Por último, as bombas de pistões axiais (figura 6) são amplamente utilizadas em aeronaves de grande porte devido à sua capacidade de operar em pressões elevadas, mantendo um design compacto e eficiente. Elas são ideais para aplicações onde é necessário gerar alta

pressão, como no controle de superfícies de voo, trem de pouso e freios, proporcionando uma operação confiável e de alta precisão. A capacidade dessas bombas de atender a demandas críticas torna-as indispensáveis em sistemas aeronáuticos, onde a segurança e o desempenho são prioridades.

Uma das principais vantagens dessas bombas é sua eficiência energética, particularmente quando projetadas com deslocamento variável. Isso permite ajustar a quantidade de fluido bombeado de acordo com a necessidade do sistema, o que melhora a economia de energia e reduz o desgaste do sistema em condições de operação variáveis. A flexibilidade de controle também facilita a adaptação da bomba a diferentes condições de voo e operações da aeronave.

Além disso, essas bombas são extremamente robustas e duráveis, projetadas para suportar longos períodos de operação sob condições adversas de pressão e temperatura. Sua capacidade de manter a pressão estável, mesmo em sistemas de alta demanda, garante que os componentes críticos da aeronave funcionem de maneira confiável, contribuindo para a segurança e eficiência dos sistemas hidráulicos durante o voo

Figura 6 – Bomba de Pistões Axiais



Fonte: (LIU HONG; TOMOVIC, 2015)

Em (HOPSAN, 2024), a válvula de passo fixo possui formulação conforme relações abaixo:

$$q_2 = \frac{D_p}{2\pi} n_p - q_{\text{leak}} \quad (2.1)$$

$$q_{\text{leak}} = C_{lp}(p_2 - p_1) \quad (2.2)$$

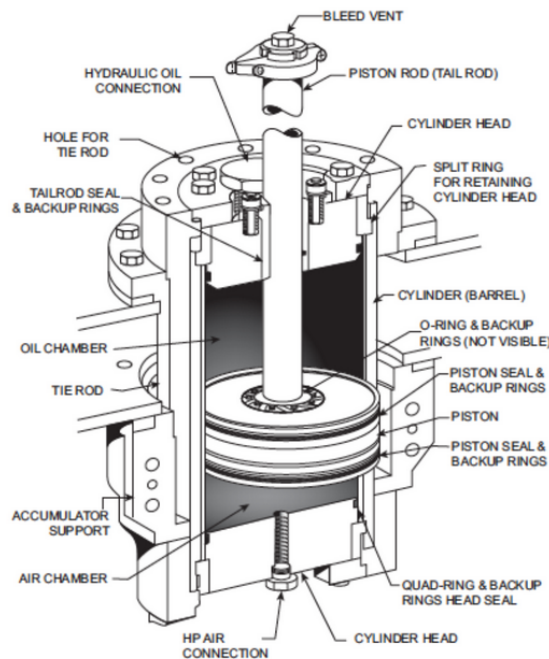
$$q_1 = -q_2 \quad (2.3)$$

onde n_p é a velocidade angular em $[rad/s]$, D_p é o deslocamento em $[m^3/rev]$ e C_{lp} é o coeficiente de vazamento em $[(m^3/s)/Pa]$.

2.2.2 Acumuladores

Os acumuladores (figura 7) desempenham um papel de reservatórios de energia hidráulica. Eles armazenam fluido pressurizado que pode ser utilizado em momentos de demanda crítica, como durante o acionamento do trem de pouso ou em situações de emergência.

Figura 7 – Bomba de Pistões Axiais



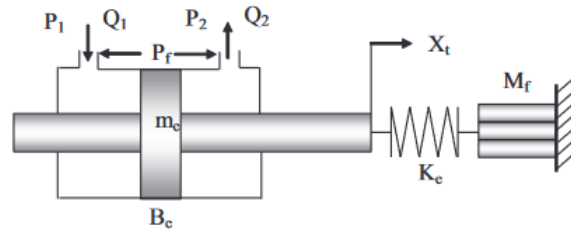
Fonte: (LIU HONG; TOMOVIC, 2015)

Existem três tipos principais de acumuladores: de mola, "peso morto" e gás. O tipo mais comum em aeronaves é o de gás, no qual um pistão separa o fluido hidráulico de um gás comprimido, como o nitrogênio. Quando a pressão no sistema cai, o gás comprimido força o fluido a retornar ao sistema, fornecendo energia adicional. Além disso, os acumuladores ajudam a suavizar picos de pressão, absorver choques hidráulicos e compensar pequenas perdas de fluido, garantindo a estabilidade e eficiência do sistema ao longo do tempo.

2.2.3 Atuadores

Atuadores (figura 8) são os dispositivos que convertem a energia hidráulica em movimento mecânico. Em aeronaves, são responsáveis por mover superfícies de controle, como ailerons, flaps, slats, bem como operar o trem de pouso. Os atuadores podem ser classificados de acordo com o tipo de sinal que recebem (mecânico, elétrico ou hidráulico) e se permitem ou não reversibilidade de movimento.

Figura 8 – Atuador Mecânico-Hidráulico



Fonte: (LIU HONG; TOMOVIC, 2015)

Atuadores mecânico-hidráulicos e eletro-hidráulicos são amplamente utilizados em sistemas aeronáuticos. Atuadores mecânico-hidráulicos utilizam sinais mecânicos do cockpit para operar as válvulas que controlam o fluido hidráulico, enquanto os eletro-hidráulicos dependem de sinais elétricos para regular as válvulas e, por isso, são essenciais em sistemas de controle Fly-by-Wire (FBW). Esse tipo de tecnologia aumenta a precisão dos controles e diminui o peso do sistema, substituindo cabos e conexões mecânicas tradicionais.

Os atuadores eletro-hidrostáticos (EHA) são outro avanço recente, combinando motores elétricos com bombas hidráulicas individuais, eliminando a necessidade de linhas hidráulicas complexas. Isso permite que o atuador opere como uma unidade independente, melhorando a eficiência e reduzindo o peso do sistema.

2.2.4 Válvulas

Válvulas são elementos críticos que controlam a vazão, a direção e a pressão do fluido dentro de um sistema hidráulico. Existem vários tipos de válvulas, cada uma desempenhando uma função específica:

- Válvulas de alívio de pressão: protegem o sistema contra sobrepensões, liberando fluido quando a pressão excede um valor seguro. Elas garantem que o sistema opere dentro dos limites estabelecidos. Sua formulação matemática no Hopsan (HOPSAN, 2024) é dada por:

$$q_2 = K_e (p_1 - p_2) = \frac{p_1 - p_{\max}}{\frac{1}{k_{cs}} + \frac{1}{k_{cf}}} \frac{p_1 - p_2}{p_{\text{nom}}} \frac{p_1 - p_2}{p_{\text{nom}}} \quad (2.4)$$

com q_2 sendo o fluxo turbulento de saída, K_e sendo o coeficiente de fluxo turbulento, k_{cs} e k_{cf} sendo coeficientes devido as características do fluido, p_{nom} sendo a pressão nominal da válvula e p_{\max} a pressão máxima de abertura.

- Válvulas direcionais: controlam o caminho que o fluido seguirá no sistema, geralmente operando com várias posições e vias para direcionar o fluido aos atuadores. Um exemplo comum é a válvula direcional de 4 vias e 3 posições, utilizada para mover

superfícies de controle ou acionar o trem de pouso. Sua modelagem é bastante complexa, e é dada em (HOPSAN, 2024)

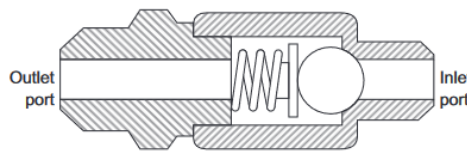
- Válvulas de retenção unidirecional (figura 9): permitem que o fluido siga em uma única direção, impedindo o retorno indesejado de fluido para certas partes do sistema, o que ajuda a manter a estabilidade do sistema e evita falhas. Sua equação de funcionamento no software é (HOPSAN, 2024):

$$q_2 = \begin{cases} K_s (p_1 - p_2), & \text{se } p_1 > p_2 \\ 0, & \text{se } p_2 \leq p_1 \end{cases} \quad (2.5)$$

onde K_s é o coeficiente de restrição.

Cada válvula precisa ser cuidadosamente projetada e ajustada de acordo com os requisitos do sistema, levando em consideração a pressão, a vazão e a resposta necessária para as operações específicas da aeronave (LIU HONG; TOMOVIC, 2015).

Figura 9 – Válvula de Retenção Unidirecional



Fonte: (LIU HONG; TOMOVIC, 2015)

2.3 Software Utilizado - Hopsan

O Hopsan é um software de simulação multidomínio desenvolvido pela Universidade de Linköping, Suécia. É amplamente utilizado para modelar sistemas hidráulicos, mecânicos e elétricos. Ele se destaca por sua capacidade de simulação de sistemas complexos de forma rápida, sendo muito eficiente em aplicações que envolvem simulação de sistemas hidráulicos em aeronaves, como o trem de pouso e superfícies de controle.

2.3.1 Método de Linhas de Transmissão (TLM)

O Hopsan utiliza o Método de Linhas de Transmissão (TLM - Transmission Line Method) como base para suas simulações (HOPSAN, 2024). Esse método modela a propagação de ondas de pressão e vazão dentro dos componentes do sistema, introduzindo atrasos controlados entre os sinais. Isso permite que os componentes interajam de forma independente, sem afetar imediatamente os outros, o que é uma grande vantagem em sistemas hidráulicos e mecânicos com várias partes interdependentes.

O TLM melhora a eficiência da simulação, especialmente em grandes sistemas, dividindo o problema em subsistemas menores. Esses subsistemas são resolvidos de maneira independente, o que reduz o tempo total de simulação, além de facilitar a integração de múltiplos domínios (hidráulico, elétrico e mecânico) em um único ambiente de simulação.

2.3.2 Modelagem de Componentes

No Hopsan, cada componente hidráulico, mecânico ou elétrico é modelado individualmente e conectado por meio de portas de entrada e saída. Componentes como bombas, acumuladores, atuadores, válvulas e linhas hidráulicas podem ser combinados para criar circuitos completos. A estrutura modular do software permite a fácil alteração de parâmetros dos componentes, como pressão, vazão, força, entre outros, oferecendo flexibilidade para ajustar o modelo conforme as necessidades do projeto.

Além disso, o Hopsan permite simular interações complexas entre componentes, como variações de pressão em um acumulador ou a dinâmica de resposta de um atuador hidráulico. A plataforma também possibilita a inclusão de controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo), permitindo testar e ajustar o controle do sistema em tempo real.

2.3.3 Aplicações e Vantagens

Uma das maiores vantagens do Hopsan é sua capacidade de simular sistemas com baixo custo computacional, o que facilita a visualização e análise de resultados de forma rápida. Isso é particularmente útil para engenheiros que trabalham em projetos críticos, como sistemas de controle de superfícies aerodinâmicas e acionamento de trens de pouso em aeronaves.

Além disso, o software é de código aberto, o que significa que os usuários podem personalizar os componentes ou criar novos modelos para atender a requisitos específicos do projeto. Isso também permite a integração com outras ferramentas de simulação e desenvolvimento, ampliando suas possibilidades de aplicação em diferentes áreas da engenharia.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Estimativa de Massa do Trem de Pouso

A estimativa de massa do trem de pouso, que visa fornecer os valores base para serem colocados no sistema cujo desenvolvimento será detalhado na seção 3.2, foi feito com base em (ROSKAM, 1985b) e nos dados desenvolvidos na disciplina de Projetos de Aeronaves I (SAA0200) conforme 1.

Para esta, foram utilizados dois métodos.

3.1.1 Cessna Method - Roskam

Este método é aplicável para aeronaves de relativa baixa performance que possuam velocidade máxima de até 200 *kts*. O avião para o qual este sistema está sendo projetado possui velocidade máxima de 210 *kts* e conforme explicado na Introdução [1] tem entre seus objetivos de missão pousar em pistas de baixa qualidade. Por isso, dado o detalhamento deste método no livro, ele será utilizado somente para que possamos calcular a distribuição de massa total entre bequilha e trem de pouso principal, uma vez que o método que utilizaremos a seguir (ROSKAM, 1985b) não faz essa distinção porém é mais adequado à aeronave em questão. Essa distribuição é importante, uma vez que nos modelo as pernas do trem de pouso principal e da bequilha serão modeladas separadamente.

Para seu cálculo temos a fórmula para não retráteis:

$$W_{g1} = 0.013W_{TO} \quad (\text{Termo 1})$$

$$+ 0.362(W_L)^{0.417}(n_{ult})^{0.950}(l_{sm})^{0.183} \quad (\text{Termo 2})$$

$$+ 6.2 + 0.0013W_{TO} \quad (\text{Termo 3})$$

$$+ 0.007157(W_L)^{0.749}(n_{ult})(l_{sn})^{0.788} \quad (\text{Termo 4})$$

que é o peso total da estrutura não retrátil.

De modo que cada termo represente uma parte da estrutura, conforme explicado abaixo:

- Termo 1: rodas e pneus do trem de pouso principal
- Termo 2: estrutura de montagem do trem de pouso principal
- Termo 3: roda e pneu da bequilha
- Termo 4: estrutura de montagem da bequilha

Para o caso de Trem de Pouso retrateis existe uma correção a ser feita dada por:

$$W_g = W_{g1} + 0.014W_{TO} \quad (3.1)$$

que é o peso de toda a estrutura com a correção do sistema retrátil aplicada.

Os valores, bem como a descrição das incógnitas apresentadas nas equações se encontra na tabela 1.

Tabela 1 – Definições dos parâmetros utilizados

Símbolo	Descrição	Valores
W_{TO}	Peso de decolagem [lbs]	18960
W_L	Peso de pouso de projeto [lbs]**	18770.4
n_{ult}	Fator de carga ultimate para pouso [-]	5.7
l_{sm}	Comprimento do amortecedor para o trem de pouso principal [ft]	3
l_{sn}	Comprimento do amortecedor para o trem de pouso do nariz [ft]	3.5

Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor de W_L ($0.99 * W_{TO}$) é retirado de uma tabela presente em (ROSKAM, 1985a). Essa tabela está no Apêndice A.

Fazendo as substituições, podemos calcular os valores de W_{g1} para o trem de pouso e para a bequilha uma vez que esse valor é dado de forma separada para os dois, temos:

$$W_{g1_{ng}} = 34.32 [lb] \quad (3.2)$$

$$W_{g1_{mg}} = 302.94 [lb] \quad (3.3)$$

com isso podemos ver que a distribuição de peso dada é de 10% para a bequilha ($W_{g1_{ng}}$) e 90% para o trem de pouso principal ($W_{g1_{mg}}$). Com isso podemos finalizar o cálculo dado por este método. Temos, conforme 3.1:

$$W_g = 602.71 [lb] = 273.74 [kg] \quad (3.4)$$

$$W_{g_{ng}} = 60.27 [lb] = 27.33 [kg] \quad (3.5)$$

$$W_{g_{mg}} = 542.44 [lb] = 246.01 [kg] \quad (3.6)$$

3.1.2 Método GD

Este método nos fornece uma equação aplicável à aeronaves comerciais, sendo um método que acaba por superdimensionar a estrutura para nossa aeronave, mas que será considerada uma abordagem conservadora devido à missão que ela busca cumprir.

Este é dado por:

$$W_g = 62.21 \left(\frac{W_{TO}}{1000} \right)^{0.84} \quad (3.7)$$

e substituindo com os valores da tabela 1 e a distribuição calculada anteriormente podemos calcular seus resultados.

$$W_g = 741.36 [lb] = 336.22 [kg] \quad (3.8)$$

$$W_{g_{ng}} = 74.14 [lb] = 33.62 [kg] \quad (3.9)$$

$$W_{g_{mg}} = 667.22 [lb] = 302.60 [kg] \quad (3.10)$$

Assim, podemos desenvolver o modelo hidráulico no Hopsan.

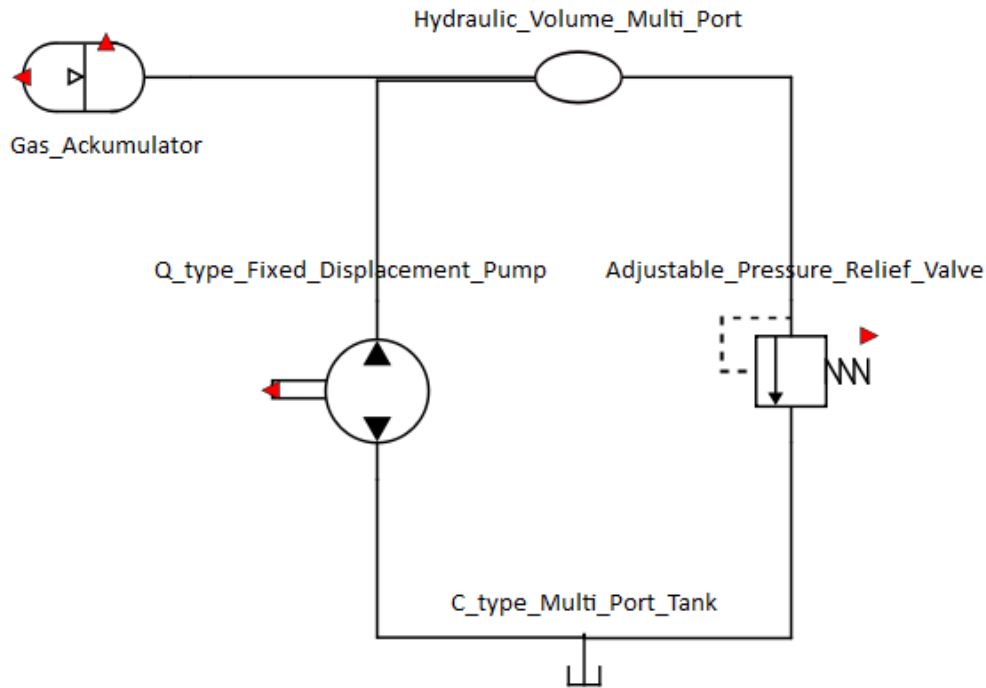
3.2 Desenvolvimento do Modelo

3.2.1 Sistema de Alimentação

Para a montagem do sistema de alimentação foram utilizados 5 elementos do software, sendo eles:

- Tanque
- Bomba de Deslocamento Fixo
- Válvula de Alívio de Pressão
- Câmara de Volume Hidráulico
- Acumulador a Gás

que foram dispostos conforme mostrado na figura 10.

Figura 10 – Sistema de Alimentação modelado no software *Hopsan*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa estrutura permite com que a bomba mova o fluido hidráulico do tanque para o volume hidráulico, que abastecerá o sistema de acionamento. A válvula funciona como um alívio de pressão do sistema, permitindo que fluido volte para o tanque em caso de excesso de pressão, não prejudicando o funcionamento do sistema de acionamento. Por fim, o acumulador a gás ajuda a garantir o envio de fluido a partir da Câmara de Volume para o sistema em caso de falta de pressão, diminuindo a oscilação do sistema.

O dimensionamento do sistema foi feito através da análise de funcionamento, verificando se o sistema atingia o funcionamento esperado e permitiu os seguintes valores:

Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizados - Alimentação

Componente	Parâmetro	Descrição	Valor
Bomba Hidráulica	n_p [RPM]	Vel. Angular	3820
	D_p [cm ³ /rev]	Deslocamento	50
Válvula de Alívio	p_{max} [psi]	pressão de abertura	2000
Câmara de Volume	V [m ³]	Volume	0.001
Acumulador a gás	V [m ³]	Volume	0.0001

Fonte: Elaborada pelo autor.

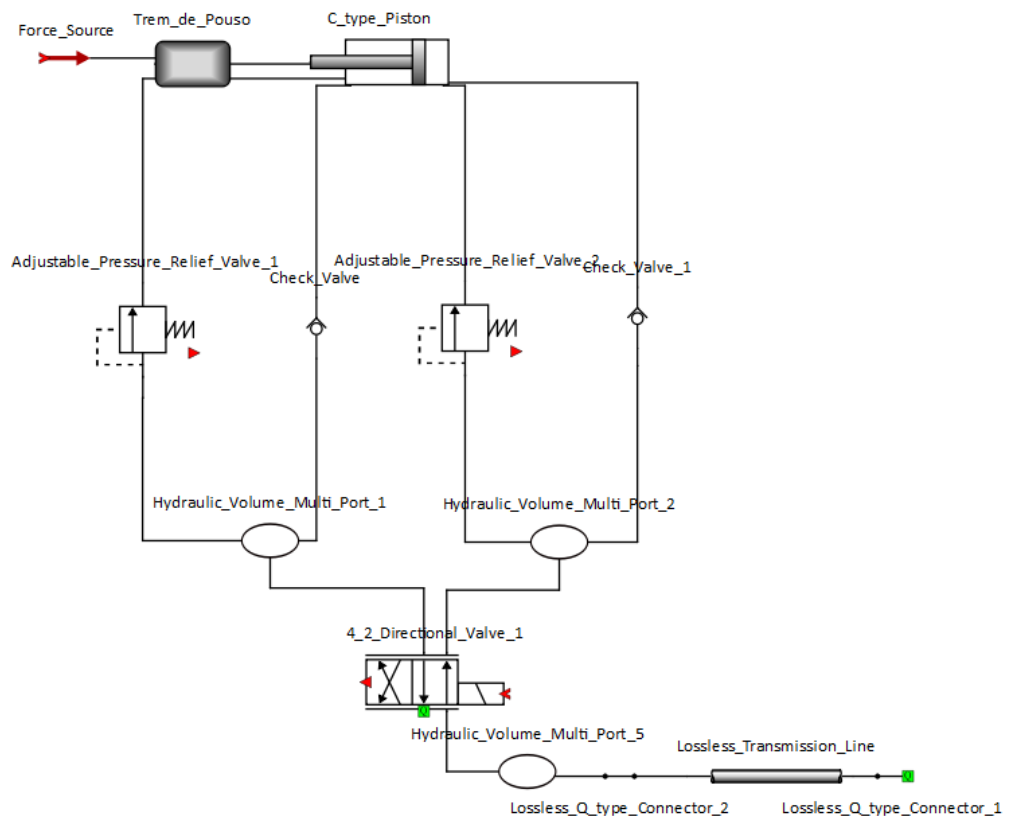
Destaca-se que por conta das condições de operação esperada para o avião, que envolve altas quantidades de poeira, seria importante incluir filtros no sistema de alimenta-

ção logo antes da entrada da bomba. Porém, como não existe esse componente no software, filtros não foram adicionados no modelo.

3.2.2 Sistema de Acionamento

O Sistema de Acionamento consiste nos elementos que conectam o pistão que movimenta o componente que se busca mover com o sistema de alimentação explicado anteriormente. Este foi modelado conforme a figura 11.

Figura 11 – Sistema de Acionamento modelado no software *Hopsan*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além dos elementos já explicados na seção anterior, temos a adição de

- Válvula Direcional 4/2
- Válvula de Retenção
- Pistão
- Massa
- Força Aplicada
- Linha de Transmissão Ideal

- Conector Ideal

As linhas e conectores são uma exigência do software para que fosse possível conectar a Câmara de Volume do sistema de alimentação com a presente na entrada do sistema de acionamento, que é responsável por enviar fluido para uma das entradas da válvula direcional, mais precisamente a válvula responsável por mover o pistão positivamente. No outro ponto de conexão dessa válvula é conectado diretamente o tanque do sistema de alimentação, de modo que para o pistão se mover negativamente o fluido empurrado é direcionado diretamente para o tanque.

Essa mesma válvula direcional então envia fluido para ambos os do pistão através de duas válvulas de alívio de pressão, que garantem que o fluido siga a direção desejada, e recebe fluido de duas válvulas de retenção.

As válvulas de retenção, por sua vez, são responsáveis por garantir que o fluido tenha um caminho de volta para a válvula direcional, sem que fluido seja enviado para o pistão no momento errado.

Por fim, o pistão tem sua saída mecânica conectada no elemento de massa, que consiste no corpo que queremos mover, podendo tanto ser uma das três pernas do sistema de trem de pouso quanto suas portas. Além disso, o elemento de força é conectado para que a massa seja inteiramente definida dentro do software.

Para os expor os valores escolhidos dos parâmetros é necessário que separemos em pernas do trem de pouso principal (tabela 3), portas do trem de pouso principal (tabela 4), bequilha (tabela 5) e porta da bequilha (tabela 6).

Tabela 3 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Pernas Trem de Pouso Principal

Componente	Parâmetro	Descrição	Valor
Válvula de Alívio	p_{max} [psi]	Pressão de abertura	600
Pistão	D_1 & D_2 [cm]	Diâmetros	8.74
Massa	m [kg]	Massa	151.3
Força Aplicada	F [N]	Força	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Portas Trem de Pouso Principal

Componente	Parâmetro	Descrição	Valor
Válvula de Alívio	p_{max} [psi]	Pressão de abertura	600
Pistão	D_1 & D_2 [cm]	Diâmetros	3.57
Massa	m [kg]	Massa	50
Força Aplicada	F [N]	Força	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Bequilha

Componente	Parâmetro	Descrição	Valor
Válvula de Alívio	p_{max} [psi]	Pressão de abertura	600
Pistão	D_1 & D_2 [cm]	Diâmetros	6.18
Massa	m [kg]	Massa	33.62
Força Aplicada	F [N]	Força	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros utilizados - Acionamento Porta da Bequilha

Componente	Parâmetro	Descrição	Valor
Válvula de Alívio	p_{max} [psi]	Pressão de abertura	600
Pistão	D_1 & D_2 [cm]	Diâmetros	3.57
Massa	m [kg]	Massa	30
Força Aplicada	F [N]	Força	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 Sistema de Lógica de Funcionamento

O sistema de lógica se baseia em 3 fatores. O input do piloto que é modelado através de um sinal de pulso, e as posições das massas equivalentes à perna do trem de pouso (bequilha) e porta.

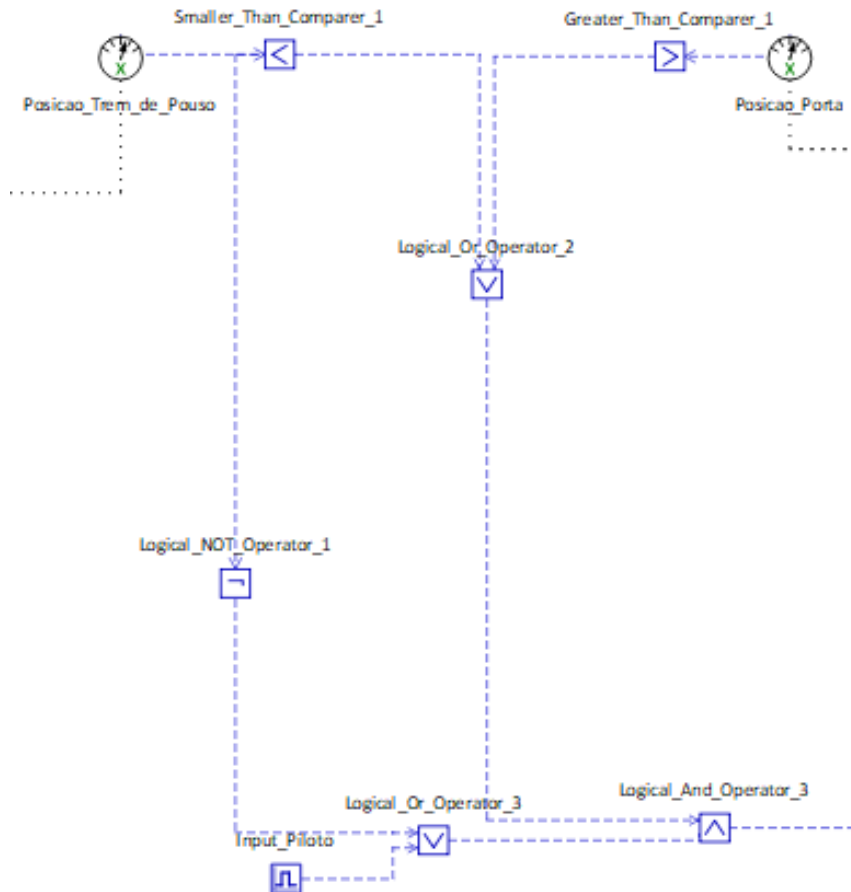
A entrada do piloto foi modelada como um sinal de pulso pois é possível escolher o momento em que o piloto aciona a abertura e o fechamento do trem de pouso. Dado que entre esses dois fatores ocorre o pouso, esse sinal teria que ser dado como valor alto (valor igual a 1) durante o processo de ligar o avião, possivelmente através de um sinal de *weight on wheels*, e só mudaria para valor baixo (valor igual a 0) quando o piloto, após a decolagem, comandasse o recolhimento.

3.2.3.1 Lógica da Porta

O sinal de trem de pouso fora da posição de recolhido (posição 0) passa por uma porta de *not* e é conectado numa porta *or* juntamente com o sinal do piloto. Este sinal

é conectado em um *and* juntamente com a saída de uma segunda porta *or* que recebe como entrada o sinal de porta completamente aberta e o sinal de perna do trem de pouso recolhido (posição 0).

Figura 12 – Sistema de Lógica da Porta modelado no software *Hopsan*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Isso permite que quando o piloto de o comando, juntamente com o sinal de perna do trem de pouso recolhida a porta seja aberta e se mantenha assim até que a perna do trem de pouso seja recolhida, mesmo quando o piloto já tenha dado o comando de recolher.

Para uma síntese do raciocínio podemos dividir o processo de abertura da porta em cinco estágios:

- Estágio 1: Avião voando e sem comando do piloto
- Estágio 2: Comando de abertura dado pelo piloto e perna do trem de pouso recolhida
- Estágio 3: Comando ativo, perna do trem de pouso e porta abertas
- Estágio 4: Comando de fechamento dado pelo piloto, perna do trem de pouso ainda não recolhida

- Estágio 5: Comando de fechamento dado pelo piloto e perna do trem de pouso recolhida.

Assim, podemos analisar separadamente os valores da lógica em cada estágio. A tabela 7 foi construída com essa finalidade, destacando que as entradas de "OR 1" são as linhas 1 e 2, as de "OR 2" são as linhas 3 e 4, e as entradas da porta "AND" são "OR 1" e "OR 2" sendo a saída desta a entrada de sinal da válvula, ou seja, quando a saída é igual a 1 a válvula move fluido para que a porta seja (ou se mantenha) aberta, e quando a saída é igual a 0 esta move o fluido no sentido contrário, para que a porta seja (ou se mantenha) fechada.

Tabela 7 – Sinais Lógicos do Sistema de Acionamento da Porta

Sinal \ Estágio	1	2	3	4	5
Input do Piloto	0	1	1	0	0
Trem de Pouso aberto	0	0	1	1	0
Porta Aberta	0	0	1	1	1
Trem de Pouso recolhido	1	1	0	0	1
OR 1	0	1	1	1	0
OR 2	1	1	1	1	1
AND	0	1	1	1	0

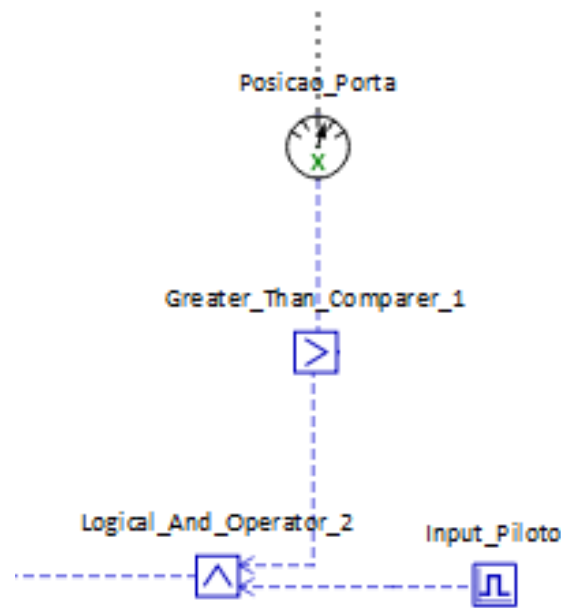
Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim podemos ver que a porta só começa a abrir a partir do estágio 2, se mantém aberta no estágio 3 e 4, e começa a fechar no estágio 5.

3.2.3.2 Lógica da Perna do Trem de Pouso

A lógica de abertura e recolhimento da perna do trem de pouso é consideravelmente mais simples que a da porta, uma vez que se baseia somente em duas entradas. O sinal dado pelo piloto e a posição da porta. Este último é processado para que mande sinal alto (valor igual a 1) quando a porta estiver completamente aberta. Ambos os valores são ligados a uma porta *AND* que é diretamente a entrada lógica da válvula, conforme figura 13.

Figura 13 – Sistema de Lógica da Perna do Trem de Pouso modelado no software *Hopsan*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, para que a perna do trem de pouso seja aberta é necessário que o piloto tenha dado o comando de abertura e que a porta do mesmo esteja completamente aberta. o recolhimento inicia no instante em que o piloto dá o comando.

3.2.4 Integração dos Sistemas

A conexão de todos os sistemas, bem como de sua lógica de funcionamento será mostrada no Apêndice B.

É importante destacar que para as entradas lógicas das válvulas direcionais das portas e pernas do trem de pouso principal utilizou-se a saída das mesmas portas lógicas. Já para a bequilha, uma vez que sua porta é mais leve, manter a mesma entrada lógica faz com que sua perna não inicie a descida assim que possível, mas que espere a abertura da porta principal para iniciar sua descida, dessa forma o sistema de controle da bequilha possui um sistema lógico separado, que recebe somente o mesmo *input* do piloto. Esa possui os mesmos elementos e mesma lógica de funcionamento explicada na seção **Sistema de Lógica de Funcionamento 3.2.3**

3.2.5 Adição de Redundância

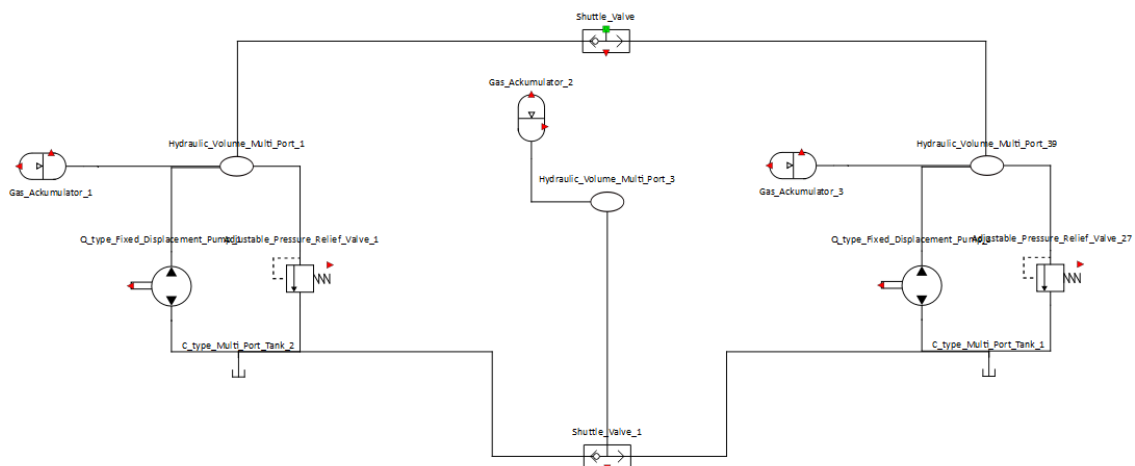
Buscando evitar que falhas no sistema de alimentação (principalmente na bomba) gerasse uma falha do sistema por completo, foi adicionada uma sistema de alimentação redundante parecido com o principal, somente com a bomba possuindo uma velocidade angular $n_p = 3342[RPM]$ ($478[RPM]$ a menos que a principal), o qual se conectou

juntamente com o sistema de alimentação principal ao sistema de acionamento através de duas válvulas alternadoras, conectando nas câmaras de volume e os tanque. A razão de essa válvula possuir uma velocidade angular um pouco menor que a do sistema principal se deve ao funcionamento da válvula alternadora.

Esta válvula funciona de modo que em sua posição inicial permite que somente o sistema principal atue, isto é, uma delas permite que somente o fluido da câmara de volume principal envie fluido para as válvulas direcionais, enquanto a outra permite que somente o tanque principal receba fluido das mesmas válvulas direcionais.

Em caso de mal funcionamento de um dos componentes do sistema de alimentação principal, gerando uma queda de pressão significativa do fluido do sistema principal, as válvulas alternadora invertem de posição, bloqueando o fluido do sistema principal, e dando acesso ao sistema redundante. A modelagem nova do sistema de alimentação é mostrado na figura 14.

Figura 14 – Sistema de Alimentação com Redundância modelado no software *Hopsan*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

4.1 Funcionamento do Sistema

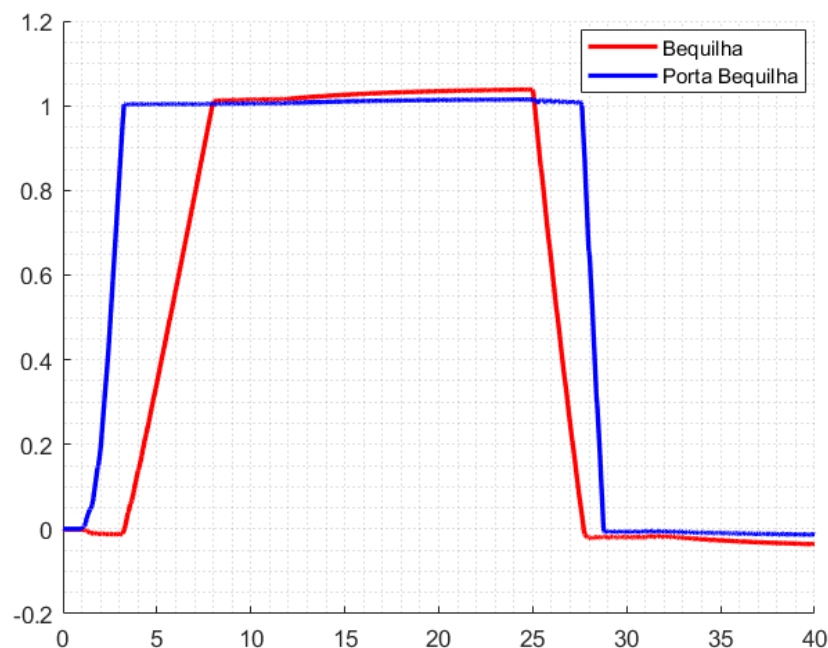
Para a análise de funcionamento do sistema, busca-se verificar a resposta de cada conjunto porta-perna a partir do comando de abertura e recolhimento, verificando se essas seguem a ordem necessária para que uma estrutura não interfira mecanicamente na outra, analisando também o tempo de resposta e de abertura.

Para essas análises, será considerado que o comando de abertura do piloto é dado no instante $t = 1s$, e o comando de recolhimento sera dado em $t = 25s$.

4.1.1 Conjunto Porta-Bequilha

É possível analisar, então, através do gráfico presente na figura 15, que logo após o comando de abertura ($t = 1s$) a porta da bequilha já inicia sua abertura, e essa se conclui no tempo $t = 3.1s$, e nesse mesmo instante a bequilha inicia sua abertura, que se conclui em $t = 8s$. Seu recolhimento então se inicia no tempo $t = 25s$, dado o comando do piloto, e é concluído em $t = 27.8s$, permitindo então o início do fechamento da porta, que se conclui em $t = 28.7s$.

Figura 15 – Funcionamento do Conjunto Bequilha-Porta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, a abertura da porta e seu fechamento demoraram $\Delta t_{abert} = 2.1s$ e $\Delta t_{fech} = 1.1s$ respectivamente, enquanto a abertura e o recolhimento da perna do trem de pouso demoraram $\Delta t_{abert} = 4.9s$ e $\Delta t_{recol} = 2.8s$. Dessa forma, após o comando de abertura do piloto, demoraram $\Delta t_{abert} = 7s$ para que essa parte do sistema estivesse pronta para o pouso, e após o comando de recolhimento $\Delta t_{fech} = 3.7s$ para que o sistema estivesse fechado novamente. Tempos resumidos na tabela 8.

Tabela 8 – Tempos de Operação Conjunto Porta-Bequilha

Estágio	Tempo Inicial [s]	Tempo Final [s]	Tempo [s]
Abertura da Porta	1	3.1	2.1
Abertura da Bequilha	3.1	8	4.9
Recolhimento da Bequilha	25	27.8	2.8
Fechamento da Porta	27.8	28.7	0.9

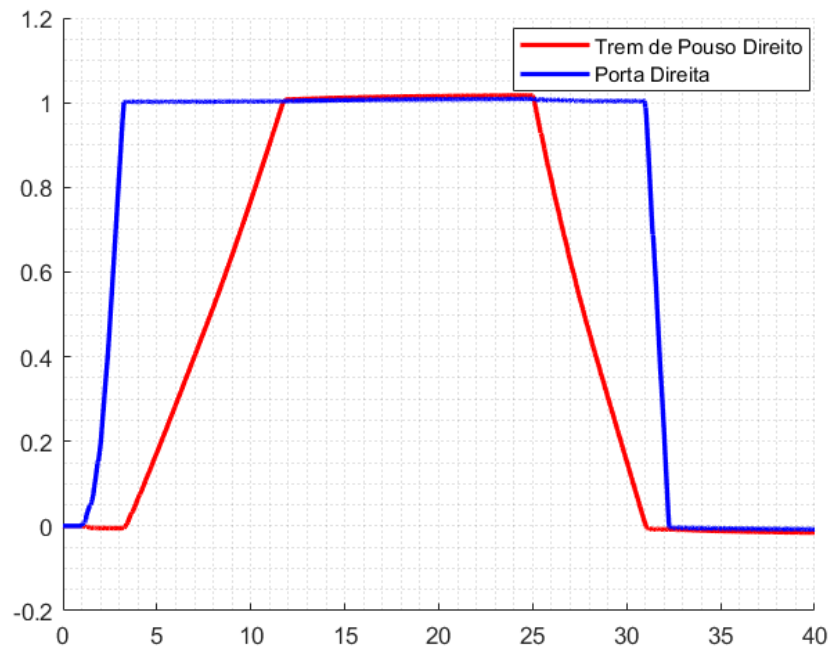
Fonte: Elaborada pelo autor

Aqui é válido citar que, conforme 15 é possível observar que por conta do sinal seguir enviando a instrução de abertura para a válvula mesmo quando o pistão está 100% aberto, a posição do pistão acaba passando do seu limite mecânico. Isso, numa estrutura real não seria possível, mas pode indicar que a estrutura do trem de pouso exerceria um esforço constante sobre a estrutura base. Isso pode ser motivação para um futuro trabalho no campo de análise estrutural de fadiga. Esse comportamento não ocorre somente na bequilha, mas é mais destacado aqui por conta desta ser mais leve.

4.1.2 Conjunto Porta-Perna Trem de Pouso Principal

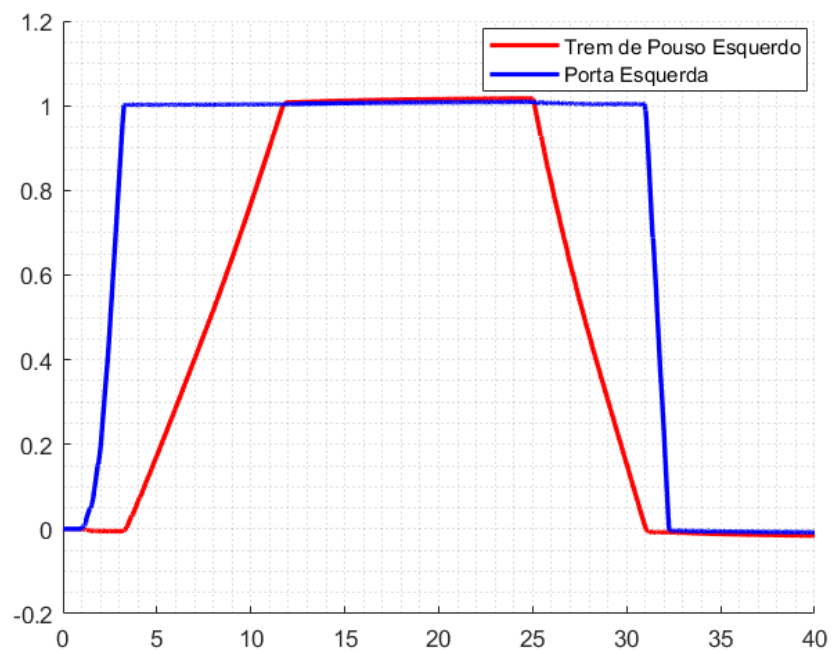
A mesma análise então é realizada através das figuras 16 e 17. É importante notar que os resultados esperados são levemente diferentes devido às diferentes massas do sistema, e ao fato de o sistema de controle da bequilha ser separado conforme explicado na subseção **Integração dos Sistemas 3.2.4.**

Figura 16 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Direito.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Esquerdo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, podemos observar que a abertura da porta também se inicia no instante em que é dado o comando ($t = 1s$) e se encerra em $t = 3.2s$, já iniciando a abertura da perna, e finalizando em $t = 11.6s$. No instante do comando de recolhimento ($t = 25s$), este já se inicia, e finaliza em $t = 31s$, instante em que o fechamento da porta é iniciado, este se finaliza em $t = 32.2s$.

Logo, a abertura da porta e seu fechamento levaram respectivamente $\Delta t_{abert} = 2.2s$ e $\Delta t_{fech} = 1.2s$, já a abertura e recolhimento da perna do trem de pouso demoraram $\Delta t_{abert} = 8.4s$ e $\Delta t_{recol} = 6s$. O que nos permite afirmar que a abertura total do sistema levou $\Delta t_{abert} = 10.6s$, enquanto o fechamento levou $\Delta t_{fech} = 7.2s$. Os dados são resumidos na tabela 9.

Tabela 9 – Tempos de Operação Conjunto Trem de Pouso Principal

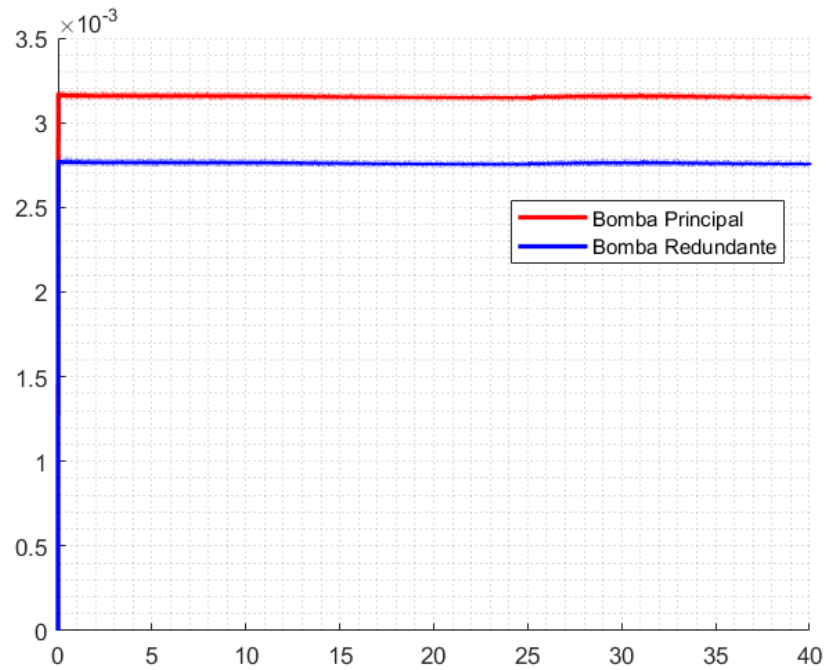
Estágio	Tempo Inicial [s]	Tempo Final [s]	Tempo [s]
Abertura da Porta	1	3.2	2.2
Abertura do Trem de Pouso	3.2	11.6	8.4
Recolhimento do Trem de Pouso	25	31	6
Fechamento da Porta	31	31.2	1.2

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Análise de Funcionamento do Sistema de Alimentação Redundante

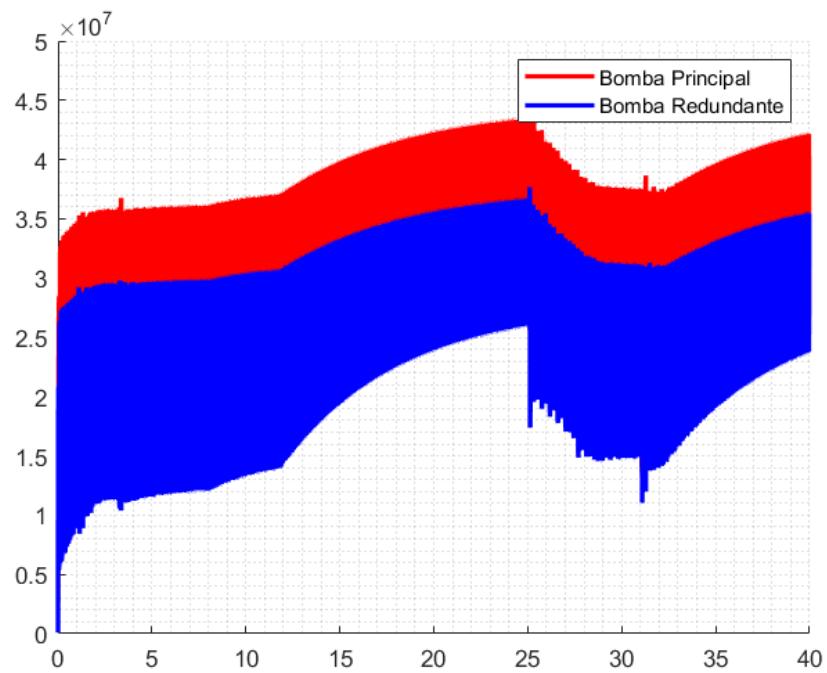
Podemos observar através dos gráficos das figuras 18 e 19, que retaram respectivamente as vazões de saída das válvulas principal e redundante, que a válvula principal entrega para a válvula seletora uma vazão maior de fluido, com uma pressão maior, de modo que esse tenha preferência para passar por essa válvula. Ambos os gráficos denotam a diferença de operação das bombas, evidenciando a razão da válvula alternadora.

Figura 18 – Comparação entre as vazões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Comparação entre as pressões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação.

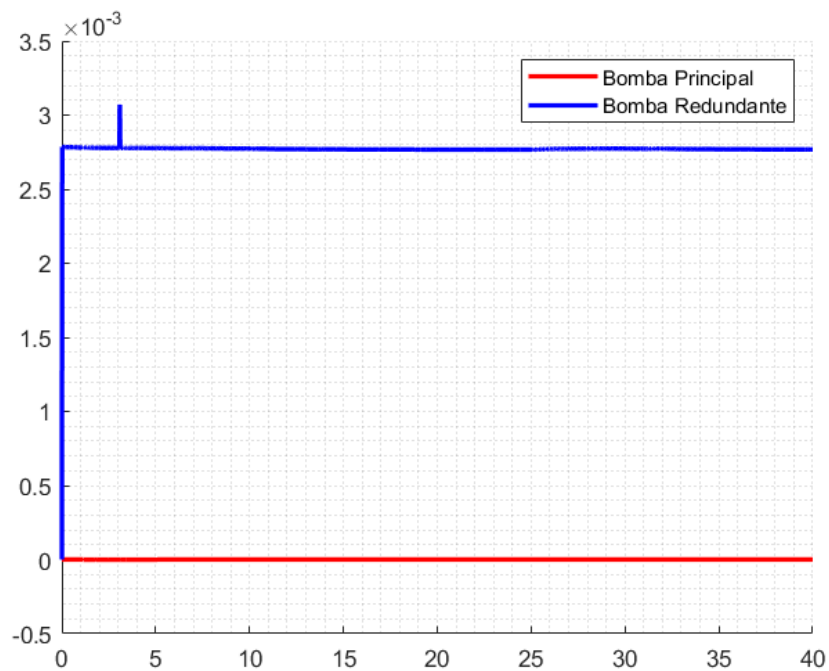


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Falha na Bomba Principal

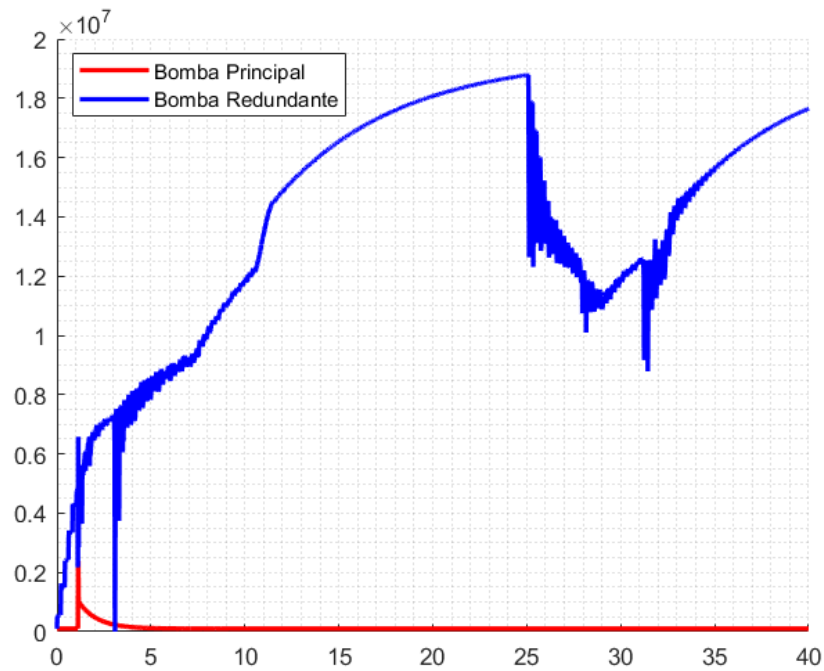
Buscando verificar o funcionamento do sistema redundante de alimentação, foi simulado o sistema com a bomba principal falhada. Essa falha foi simulada através da diminuição de sua velocidade angular para zero. É possível rever a comparação entre as vazões (figura 20) e as pressões (figura 21).

Figura 20 – Comparação entre as vazões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação com a válvula principal falhada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

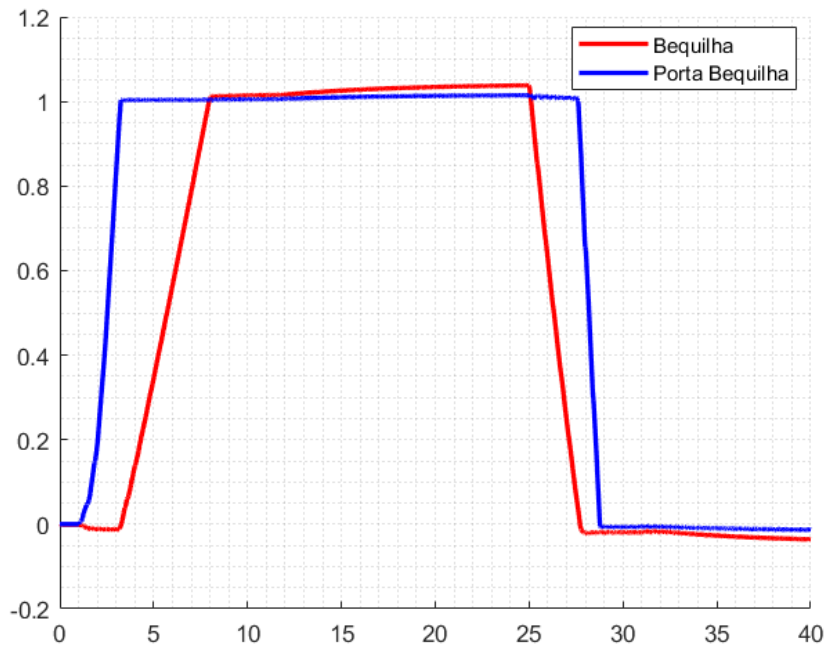
Figura 21 – Comparação entre as pressões de saída das válvulas dos sistemas de alimentação com a válvula principal falhada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar quando essa falha é simulada, o funcionamento do sistema não para, mas somente faz com que o sistema complete suas funções em tempos ligeiramente maiores (figuras 22 e 23) pois a bomba opera com vazão e pressão menores, e a vazão de saída da válvula do sistema redundante apresenta um comportamento próximo ao de alimentação principal permitindo o funcionamento.

Figura 22 – Funcionamento do Conjunto Bequilha-Porta com sistema de alimentação redundante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, com base no gráfico presente na figura 22, vemos que logo após o comando de abertura ($t = 1s$) a porta da bequilha já inicia sua abertura, e essa se conclui no tempo $t = 3.5s$, e nesse mesmo instante a bequilha inicia sua abertura, que se conclui em $t = 8.6s$. Seu recolhimento então se inicia no tempo $t = 25s$, dado o comando do piloto, e é concluído em $t = 28s$, permitindo então o início do fechamento da porta, que se conclui em $t = 29.1s$.

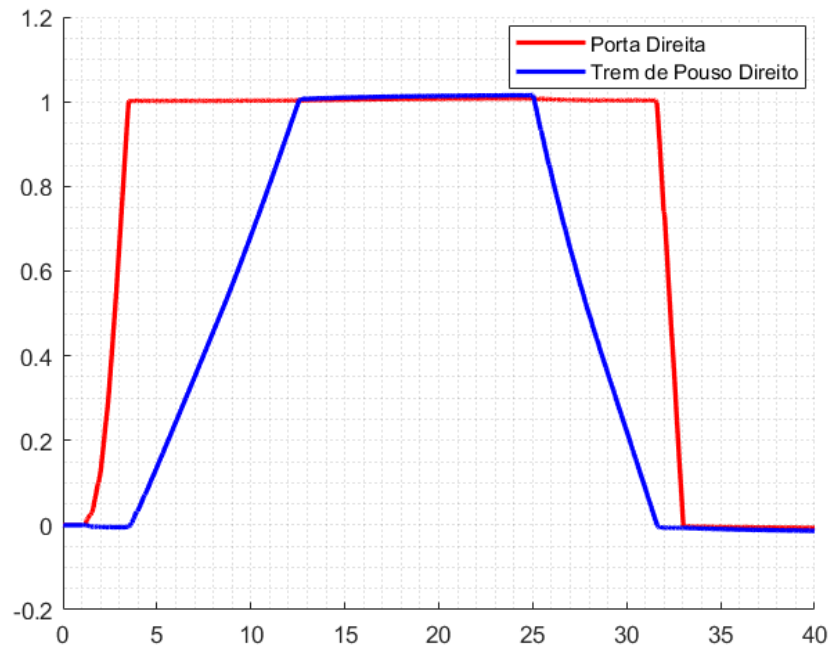
Ou seja, o tempo de abertura total do sistema foi de $\Delta t_{abert} = 7.6s$, sendo $0.6s$ mais lento que o sistema principal, e o de fechamento foi de $\Delta t_{fech} = 4.1s$, sendo $0.4s$ mais lento que o sistema principal. Tempos mostrados na tabela 10 comparando com os tempos de operação normal.

Tabela 10 – Tempos de Funcionamento Conjunto Bequilha-Porta com Bomba Principal Falhada

Estágio	Δt de Operação Normal [s]	Δt de Operação Falhada [s]	Δ [%]
Abertura da Porta	2.1	2.5	19.05
Abertura da Bequilha	4.9	5.1	4.08
Recol. da Bequilha	2.8	3	7.14
Fechamento da Porta	0.9	1.1	22.22

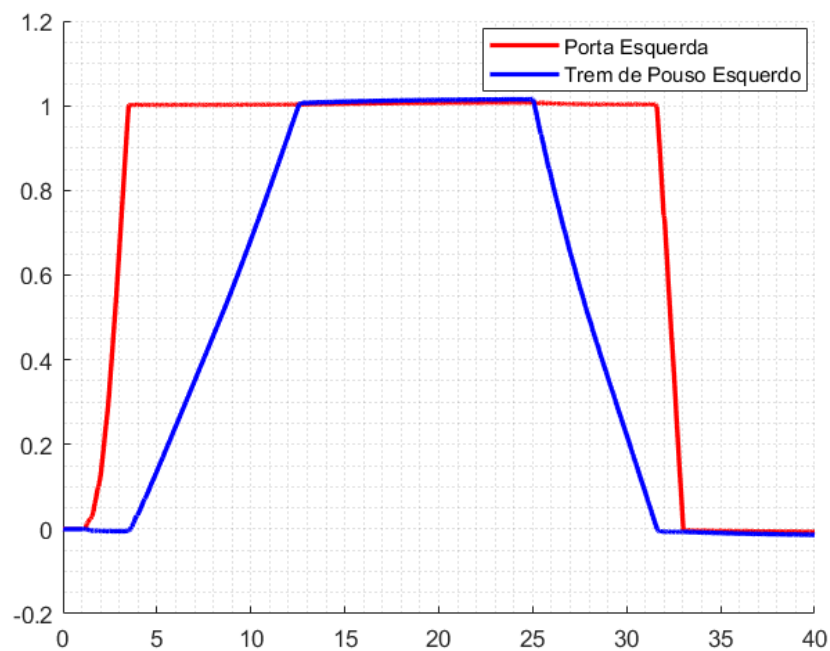
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Direito com sistema de alimentação redundante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Funcionamento do Conjunto Perna-Porta do Trem de Pouso Principal Esquerdo com sistema de alimentação redundante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Realizando a mesma análise nos gráficos das figuras 23 e 24 podemos ver que a abertura da porta também se inicia no instante em que é dado o comando ($t = 1s$) e se encerra em $t = 3.5s$, já iniciando a abertura da perna, e finalizando em $t = 12.5s$. No instante do comando de recolhimento ($t = 25s$), este já se inicia, e finaliza em $t = 31.7s$, instante em que o fechamento da porta é iniciado, este se finaliza em $t = 33s$.

Desse modo, o tempo de abertura total do sistema foi de $\Delta t_{abert} = 11.5s$, sendo $0.9s$ mais lento que o sistema principal, e o de fechamento foi de $\Delta t_{fech} = 8s$, sendo $0.8s$ mais lento que o sistema principal. Os tempos estão resumidos na tabela 11, comparados com os tempos de funcionamento normal.

Tabela 11 – Tempos de Funcionamento Conjunto Porta-Trem de Pouso Principal com Bomba Principal Falhada

Estágio	Δt de Operação Normal [s]	Δt de Operação Falhada [s]	Δ [%]
Abertura da Porta	2.2	2.5	13.64
Abert. do Trem de Pouso	8.4	9	7.14
Recol. do Trem de Pouso	6	6.7	11.67
Fechamento da Porta	1.2	1.3	8.33

Fonte: Elaborada pelo autor

Para concluir essa seção, destaca-se que aqui existe espaço para mais um trabalho baseado neste. É possível desenvolver um estudo de *Fault Hazard Analysis* sobre esse sistema, definindo os níveis de falha do sistema completo e parcialmente, podendo conter até mesmo árvores de falha, detalhando mais os componentes do sistema.

5 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento deste projeto, foi possível projetar e simular o funcionamento de um sistema hidráulico de trem de pouso para a aeronave desenvolvida nas disciplinas de Projetos de Aeronaves I (SAA0200) e Projetos de Aeronaves II (SAA0201), empregando o software Hopsan como ferramenta de análise e modelagem. O trabalho incluiu a adição de um sistema de alimentação redundante, visando garantir a confiabilidade e a segurança do sistema em caso de falhas no sistema principal. Com isso, buscou-se assegurar que o trem de pouso pudesse operar corretamente mesmo em condições adversas.

As simulações realizadas em condições normais de funcionamento e em condições de falha demonstraram o desempenho eficiente e a robustez do sistema hidráulico projetado. Em ambas as análises, o sistema manteve a estabilidade e o comportamento buscado, comprovando que a redundância incorporada ao sistema de alimentação foi eficaz em mitigar riscos e garantir a continuidade da operação. Além disso, o uso do Hopsan permitiu uma visualização detalhada do fluxo hidráulico e da resposta dos atuadores, facilitando a identificação de potenciais pontos de melhoria e a validação das especificações de projeto.

Dessa forma, o trabalho atingiu os objetivos propostos, fornecendo uma base sólida para futuros estudos de projetos no campo de sistemas hidráulicos aeronáuticos. As técnicas e abordagens aplicadas aqui poderão ser utilizadas como referência para o desenvolvimento de projetos em outras partes de aeronaves e em diferentes contextos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- HOPSAN. **Hopsan Documentation**. 2024. Acesso em: 25 nov. 2024. Disponível em: <https://hopsan.github.io/documentation/index.html>.
- LIU HONG; TOMOVIC, M. W. S. **Commercial aircraft hydraulic systems : Shanghai Jiao Tong University Press aerospace series**. 1. ed. [*S.l.: s.n.*]: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2015. (Shanghai Jiao Tong University Press aerospace series). ISBN 0124199720; 9780124199729.
- MOIR, I.; SEABRIDGE, A. **Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration**. 3rd. ed. [*S.l.: s.n.*]: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- ROSKAM, J. **Airplane Design Part I: Preliminary Sizing of Airplanes**. 1st. ed. [*S.l.: s.n.*]: Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1985.
- ROSKAM, J. **Airplane Design Part V: Component Weight Estimation**. 1st. ed. [*S.l.: s.n.*]: Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1985.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA DE W_L - ROSKAM

Tabela 12 – Valores Típicos para a Razão de Peso de Pouso para Peso de Decolagem

Nº	Tipo de Aeronave	Mínimo	Média	Máximo
1	<i>Homebuilts</i>	0.96	1.0	1.0
2	Monomotores com Hélice	0.95	0.997	1.0
3	Bimotores com Hélice	0.88	0.99	1.0
4	Aeronaves Agrícolas	0.7	0.94	1.0
5	Jatos Executivos	0.69	0.88	0.96
6	TBP Regionais	0.92	0.98	1.0
7	Jatos de Transporte	0.65	0.84	1.0
8	Treinadores Militares	0.87	0.99	1.1
9	Caças	0.78 (jatos) 0.57 (tbp's)	dados insuficientes	1.0
10	Patrulha Militar, Bombardeiro e Transporte	0.68 (jatos) 0.77 (tbp's)	0.76 0.84	0.83 1.0
11	Hidroaviões e Aeronaves Anfíbias	0.79 (terra) 0.98 (água)	dados insuficientes	0.95 1.0
12	Aeronaves Supersônicas	0.63	0.75	0.88

Fonte: (ROSKAM, 1985a)

Tabela localizada na página 107, capítulo 3 do livro *Airplane Design Part I: Preliminary Sizing of Airplanes*, por Dr Jan Roskam.

APÊNDICE B – MODELO HIDRÁULICO COMPLETO

A imagem do modelo completo é mostrada na figura 25.

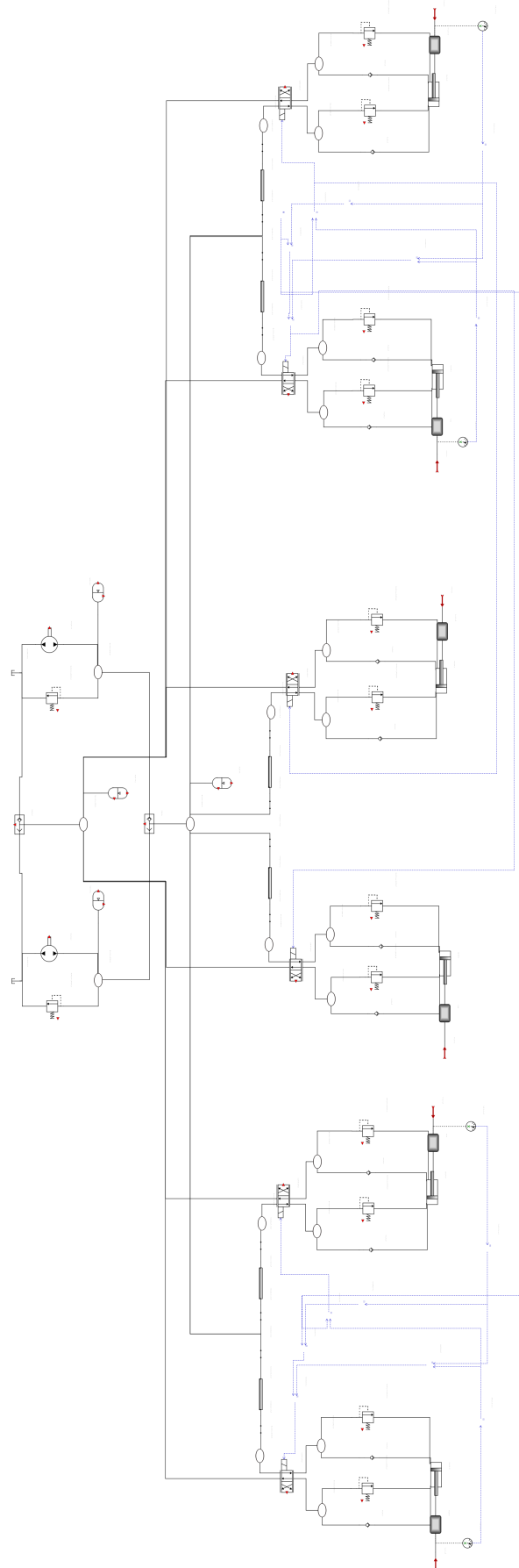


Figura 25 – Modelo completo desenvolvido no software *Hopsan*.

Fonte: Elaborada pelo Autor.