

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
COMPUTAÇÃO E SISTEMAS – PECS

**THALLYS ANDERSON MACHADO FERREIRA**

**DETECÇÃO E ISOLAMENTO DE FALHAS NO SISTEMA DE  
ATUAÇÃO DE FOGUETES UTILIZANDO GRAFOS DE  
LIGAÇÃO (BOND GRAPH)**

São Luís

2019

**THALLYS ANDERSON MACHADO FERREIRA**

**DETECÇÃO E ISOLAMENTO DE FALHAS NO SISTEMA DE  
ATUAÇÃO DE FOGUETES UTILIZANDO GRAFOS DE  
LIGAÇÃO (BOND GRAPH)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Sandoval Góes

São Luís  
2019

Ferreira, Thallys Anderson Machado.

Detecção e isolamento de falhas no sistema de atuação de foguetes utilizando grafos de ligação (bond graph) / Thallys Anderson Machado Ferreira. – São Luís, 2019.

67 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto.

1.Grafos de ligação. 2.Detecção e isolamento de falhas. 3.Relação de redundância analítica. I.Título

CDU: 004.9:629.76

THALLYS ANDERSON MACHADO FERREIRA

DETECÇÃO E ISOLAMENTO DE FALHAS NO SISTEMA DE  
ATUAÇÃO DE FOGUETES UTILIZANDO GRAFOS DE  
LIGAÇÃO (BOND GRAPH)

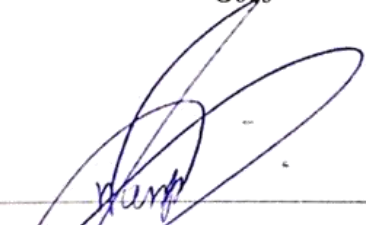
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Sandoval

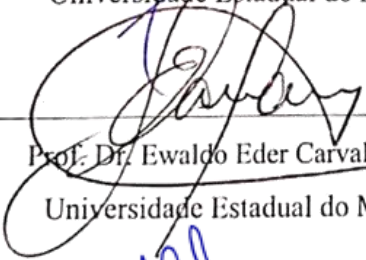
Góes

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/2019



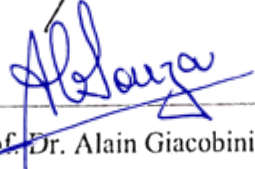
---

Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto  
Universidade Estadual do Maranhão



---

Prof. Dr. Ewaldo Eder Carvalho Santana  
Universidade Estadual do Maranhão



---

Prof. Dr. Alain Giacobini Souza  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Dedico este trabalho aos meus pais,  
ao meu irmão e toda a minha família  
Machado/Ferreira.

## Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus, por ter sempre me vigiado e cuidado de mim tanto nos momentos difíceis quanto nos bons e por sempre abençoar minha vida e de minha família mesmo quando não reconhecamos.

Aos meus batalhadores e amados pais Fran e Nena, por sempre ensinarem a mim o caminho certo da vida e por sempre colocarem seus filhos a frente de tudo e de todos até em detrimento deles mesmos. Por ter nos ensinado que devemos batalhar de forma honesta para alcançar os objetivos de nossa vida e que nada vem de graça.

Ao meu irmão Tássio é uma pessoa que eu amo muito e é aquela história, só implicamos com quem gostamos e queremos ver bem.

À minha namorada Nídia por me dar o suporte sempre que necessário.

Ao meu tio Antônio por confiar no meu potencial e me conceder subsídio para eu poder desenvolver as minhas competências.

À minha amada tia Mana por ser minha segunda mãe e ter me ensinado valores maravilhosos e da crença em Deus.

A minha afilhada, primos, tios e tias da família Machado e Ferreira, gostaria de citar um por um, contudo, os agradecimentos superariam em muito o meu trabalho e não quero comentar a injustiça de esquecer alguém, amo todos de forma igual e gosto de estar na presença de todos.

À parceria UEMA/ITA/CLA por meio Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e Sistemas que trouxe os mais capacitados professores e técnicos que a compõem para nos trazerem as informações mais relevantes quanto a engenharia aeroespacial e à FAPEMA por ter fomentado todo o estudo e pesquisa.

Ao meu professor e orientador Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto, por ter me aceito como orientando, estar disposto a auxiliar nas minhas dúvidas e por me sugerir ideias que melhoraram meu trabalho e ao excelentíssimo Prof. Luis Carlos Sandoval Góes por suas aulas, conhecimento em Grafo de ligação e coorientação.

Aos colegas do programa por sempre estarem ajudando para que todos consigam concluir o curso.

*“Seja forte e corajoso! Não se apavore,  
nem desanime, pois, o senhor, o seu Deus,  
estará com você por onde você andar”.*

(Josué 1.9)

## Resumo

Com o incremento de novos estudos e desenvolvimento de novas tecnologias, os sistemas modernos ficaram mais complexos, contudo, tais equipamentos ainda ficam suscetíveis a falhas. Quando estas falhas são previamente identificadas, o processo de manutenção se torna mais simples e barato. Algumas técnicas de detecção e identificação de falhas são conhecidas e propostas com a finalidade de determinar seu tipo e localização através de estimativas de parâmetros ou por métodos baseados em modelagem de sistemas reais. As técnicas baseadas em modelo impõem ao sistema robustez com a detecção rápida e isolamento das mesmas. Esta dissertação busca estudar a detecção e isolamento de falhas (FDI) no sistema de atuação de foguetes por modelagem em Grafos de Ligação (Bond Graph, BG) no software 20-sim. Os Grafos de Ligação possuem uma abordagem bastante intuitiva, pois se baseiam no princípio de conservação de energia e a representação gráfica facilita o desenvolvimento do método FDI. O processo de identificação das falhas consiste em dois passos: o primeiro passo estabelece as equações constitutivas a partir do BG para cada junção ligada a um sensor, enquanto o segundo passo trata da elaboração de uma matriz de falha que permite verificar cada sinal de falha e de acordo com a assinatura isolá-la. Para esta dissertação será apresentada a servoválvula eletrohidráulica numa estrutura de modelagem BG que facilita derivar modelos analíticos, eliminando as variáveis desconhecidas e gerando Relações Analíticas de Redundância (ARR) que são restrições derivativas que fornecem os dados para a matriz de falha.

Palavras-chave: Grafos de Ligação, Detecção e Isolamento de Falhas, Relação de Redundância Analítica.



## Abstract

As new studies and new technologies have developed, modern systems have become more complex, but such equipment is still susceptible to failure. When these faults are previously identified, the maintenance process becomes simpler and cheaper. Some fault detection and identification techniques are known and proposed in order to determine their type and location through parameter estimates or methods based on real system modeling. Model-based techniques impose robustness on the system with rapid detection and isolation. This dissertation aims to study the fault detection and isolation (FDI) in the bond graph modeling rocket actuation system (Bond Graph, BG) in the 20-sim software. Binding Graphs have a very intuitive approach as they are based on the principle of energy conservation and the graphical representation facilitates the development of the FDI method. The fault identification process consists of two steps: the first step establishes the constituent equations from BG for each junction connected to a sensor, while the second step deals with the elaboration of a fault matrix that allows checking each fault signal and according to the signature isolate it. For this dissertation the electrohydraulic servo valve will be presented in a BG modeling structure that facilitates the derivation of analytical models, eliminating unknown variables and generating Redundant Analytical Relations (ARR) which are derivative constraints that provide the data for the failure matrix.

Keywords: Bond Graphs, Fault Detection and Isolation, Analytical Redundancy Relations.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Esquema do CVE por junta flexível do veículo espacial.....	19
Figura 2.1 - Representação Empuxo.....	23
Figura 2.2 - Ângulos de elevação e azimute do lançador.....	24
Figura 2.3 - Curva da Banheira e ciclo de vida. ....	26
Figura 2.4 - Representação genérica de Sistema. ....	27
Figura 2.5 - Tetraedro de estado [20] .....	28
Figura 2.6 - Motor DC em Grafo de Ligação (BG).....	28
Figura 2.7 - Esquema genérico de diagnóstico de falhas. ....	29
Figura 2.8 - Fluxograma do método FDI com ARR. ....	32
Figura 2.9 - Esquema do servoatuador. ....	33
Figura 3.1 - Esquema do motor de torque e válvula bocal palheta. ....	36
Figura 3.2 - Modelo em BG do motor de torque.....	37
Figura 3.3 - Esquema hidráulico da válvula bocal-palheta. ....	38
Figura 3.4 - Modelo em BG, domínio hidráulico, para válvula bocal-palheta linear.....	39
Figura 3.5 - Esquema da válvula camisa-carretel de 4 vias.....	39
Figura 3.6 - Modelo em BG, no domínio mecânico, do carretel da válvula camisa-carretel...40	
Figura 3.7 - Modelo em BG, no domínio hidráulico, do carretel da válvula camisa-carretel. 41	
Figura 3.8 - Modelo em BG da válvula camisa-carretel com $Q_L$ linear. ....	42
Figura 3.9 - Esquema do atuador hidráulico.....	42
Figura 3.10 - Modelo em BG do atuador hidráulico, em função de $Q_L$ e $P_L$ .....	43
Figura 3.11 - Esquema geométrico da tubeira móvel.....	44
Figura 3.12 - BG da tubeira móvel.....	45

Figura 3.13 - Esquema do sistema de realimentação.....	46
Figura 3.14 - BG do sistema de realimentação.....	46
Figura 3.15 - BG linear completo do servoatuador. ....	48
Figura 4.1 - BG do servoatuador com causalidade integral .....	51
Figura 4.2 - BG do servoatuador com causalidade derivativa.....	52
Figura 5.1 - BG para avaliação do sensor $Df : \omega_{path}$ .....	53
Figura 5.2 - BG para avaliação do sensor $Df : v_{VP}$ .....	55
Figura 5.3 - BG para avaliação do sensor $Df : v_{at}$ .....	58

## **Lista de Tabelas**

Tabela 5.1 - Matriz de assinatura de falha

60

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>ARR</i>	Analytical Redundancy Relation, Relação de Redundância Analítica.
<i>BG</i>	Bond Graphs, grafos de ligação.
<i>CG</i>	Centro de gravidade.
<i>CLA</i>	Centro de Lançamento de Alcântara.
<i>CVE</i>	Controle de Vetor Empuxo.
<i>FD</i>	Fault Detectability, Detecção de falhas.
<i>FI</i>	Fault Isolability, Isolamento de Falhas.
<i>IAE</i>	Instituto de Aeronáutica e Espaço.
<i>VLS</i>	Veículo Lançador de Satélite.

## Lista de Símbolos

$a$	Braço da palheta
$A_{PH}$	Área do pistão hidráulico.
$A_{VP}$	Área lateral do carretel da válvula camisa-carretel.
$B_{fimcurso}$	Amortecimento do dissipador fim de curso do atuador hidráulico.
$B_{palh}$	amortecimento viscoso angular da palheta.
$B_{VP}$	amortecimento viscoso no carretel.
$C_{iVP}$	coeficiente geral de vazamento das câmaras da válvula camisa-carretel.
$F_{at}$	força aplicada pelo servoatuador na tubeira.
$F_{ra}$	força do sistema de realimentação sobre a extremidade superior da palheta.
$J_{palh}$	momento de inércia da palheta.
$J_{tub}$	momento de inércia da tubeira.
$K_{cpalh}$	coeficiente vazão-pressão da válvula bocal-palheta.
$K_{cVP}$	coeficiente vazão-pressão da válvula camisa-carretel.
$K_{fimcurso}$	Rigidez de fim de curso do atuador hidráulico.
$K_{mmag}$	Rigidez magnética do motor de torque.
$K_{mfb}$	Rigidez da mola de realimentação.
$K_{mj}$	Rigidez elástica rotacional da junta flexível.
$K_{mVP}$	Rigidez de cada uma das molas de centralização do carretel na válvula camisa-carretel.
$K_{mMT}$	Rigidez equivalente do conjunto motor de torque e válvula bocal-

	palheta.
$K_{qpath}$	Ganho vazão-deslocamento da válvula bocal-palheta.
$K_{qVP}$	ganho vazão-deslocamento da válvula camisa-carretel.
$K_{sh}$	Rigidez da “mola hidráulica” da válvula camisa-carretel.
$K_{imag}$	Constante entre o torque do motor de torque e a corrente elétrica de comando $i_c$ .
$k_{tub}$	Constante proporcional entre o deslocamento angular da tubeira e o deslocamento linear do pistão hidráulico.
$l_1, l_2$	braços da alavanca de realimentação.
$l_3, l_4$	braços da palheta.
$m_{VP}$	Massa do carretel da válvula camisa-carretel.
$m_p$	Massa do pistão hidráulico.
$m_{tub}$	Massa da tubeira.
$P_L$	pressão de carga entre os dois lados do pistão hidráulico.
$P_{cL}$	pressão de carga de controle.
$P_{c1}, P_{c2}$	Pressões de controle.
$Q_1, Q_2$	Vazão das câmaras esquerda e direita, respectivamente, do atuador hidráulico.
$Q_{cVP1}, Q_{cVP2}$	Vazão das câmaras de controle esquerda e direita, respectivamente, da válvula camisa-carretel.
$Q_{c1}, Q_{c2}, Q_{c3}, Q_{c4}$	Vazões na válvula bocal-palheta.
$Q_{cL}$	Vazão de carga de controle.
$Q_L$	Vazão de carga para o atuador hidráulico.
$u(t)$	deslocamento linear da extremidade da palheta entre os bocais da válvula bocal-palheta.

$u_0$	espaçamento inicial entre a palheta e a saída do bocal.
$V_{VP}$	Volume de cada câmara de controle da válvula camisa-carretel quando o carretel está centralizado.
$w(t)$	deslocamento da extremidade da palheta conectada à mola de realimentação de força.
$x_{VP}(t)$	deslocamento linear do carretel da válvula camisa-carretel.
$y_{at}(t)$	deslocamento linear do pistão hidráulico.
$z_{al}(t)$	deslocamento da extremidade menor da alavanca de realimentação.
$\theta_{al}(t)$	deslocamento angular da alavanca.
$\theta_{palh}(t)$	deslocamento angular da palheta.
$\theta_{tub}(t)$	deslocamento angular da tubeira



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação de pesquisa .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
1.2.1	Geral .....	20
1.2.2	Objetivos Específicos .....	20
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Empuxo.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Foguete controlado e não controlado.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Supervisão de processos e sistemas multifísicos .....</b>	<b>25</b>
2.3.1	Mau Funcionamento, Faltas e Falhas .....	25
<b>2.4</b>	<b>Modelos de Sistema .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>Grafos de Ligação (BG) e o software 20-sim.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6</b>	<b>Relação de Redundância Analítica (ARR) .....</b>	<b>29</b>
<b>2.7</b>	<b>Servoatuador .....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MODELAGEM DO SERVOATUADOR.....</b>	<b>35</b>
3.1.1	Modelo da Servoválvula Eletrohidráulica .....	35
3.1.2	Modelo do Atuador Hidráulico.....	42
3.1.3	Modelo da Carga Movida pelo Servoatuador.....	44
3.1.4	Modelo do Sistema Mecânico de Realimentação de Posição.....	45
3.1.5	Modelo Linear para o Servoatuador .....	47
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>FORMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>7.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

# 1 Introdução

Com o advento de novas formas de produção e atividade industriais específicas, o homem começou a manusear instrumentos e desenvolver máquinas para a produção de bens de consumo. Para manter em funcionamento uma linha produtiva ou um equipamento específico foram desenvolvidas várias técnicas para diminuir falhas e melhorar robustez desses sistemas.

Com o passar dos anos, processos industriais passaram a ser automatizados buscando a qualidade, aumento da produtividade e mitigação de erros de operação. Contudo, a ocorrência de falha é intrínseca aos sistemas industriais e precisam ser identificadas para que possam ser corrigidas.

Quando uma falha for detectada e diagnosticada, é possível realizar a manutenção do sistema e reduzir os custos globais do ciclo de vida, aumentar a disponibilidade, melhorar a segurança dos operadores e reduzir os incidentes ambientais [16].

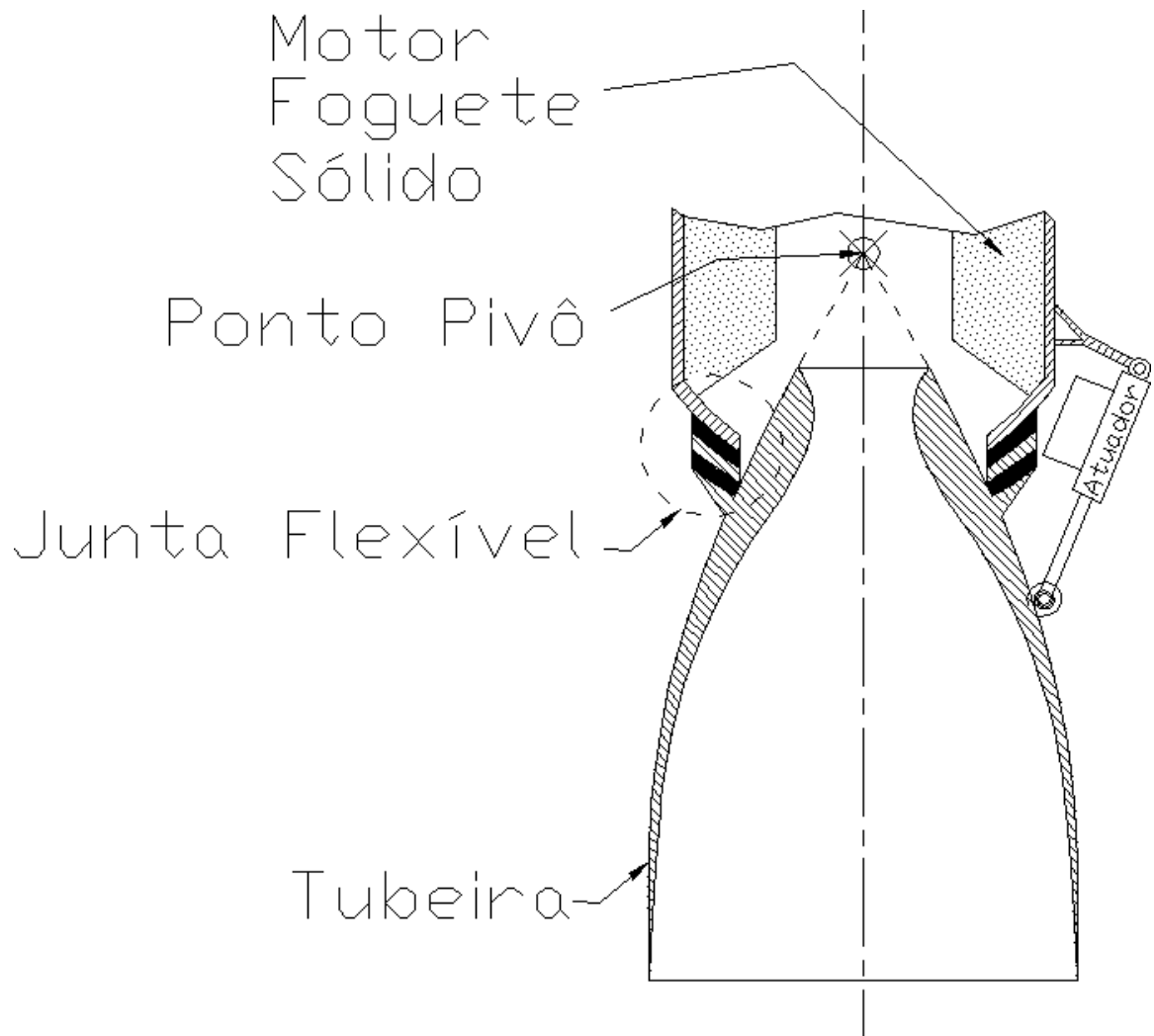
Os primeiros métodos propostos com a finalidade de analisar falhas tratam de uma abordagem *off-line*, ou seja, não é em tempo real. Esse método é representado, por exemplo, pela Análise de Modos de Falha e Efeitos (Failure Mode Effects Analysis, FMEA) que previne falhas e analisa os riscos de um processo, através da identificação de causas e efeitos para propor as ações que serão utilizadas para inibir as falhas [3, 26]. Entretanto, o aumento da complexidade dos sistemas tem requerido monitoramento automatizado e diagnóstico rápido para a segurança dos processos [3].

Os sistemas industriais estão cada vez mais complexos devido, em parte, ao seu tamanho crescente e à integração de novas tecnologias. Com o envelhecimento, esses sistemas se tornam mais vulneráveis a falhas e sua manutenção difícil e cara. De acordo com dados estatísticos, 70% dos acidentes industriais são devidos a erros humanos [33].

Um índice tão alto de erros humanos pode ser resultado de interpretação imprecisa do que realmente esteja acontecendo ao sistema e por isso é necessária uma operação em tempo real dos procedimentos de detecção e isolamento de falhas.

Nesse contexto de complexidade, o desenvolvimento desse trabalho será com base no estudo concebido em [15] do servocontrolador de posição eletrohidráulico, denominado a partir de agora apenas de servoatuador, que controla a atitude/trajetória de veículos espaciais por meio do deslocamento angular do vetor de empuxo. Este servoatuador é fixado à tubeira e à estrutura do motor foguete, como ilustrado na figura 1.1.

Figura 1.1 - Esquema do CVE por junta flexível do veículo espacial.



Fonte: [15]

Com base neste servoatuador, os procedimentos de detecção e isolamento de falhas (Fault Detection Isolation, FDI) serão implementados ao decorrer deste trabalho utilizando a abordagem de Grafos de Ligação (Bond Graph, BG) na plataforma do software 20-sim e, logo depois, a elaboração das Relações Analíticas de Redundância (Analytical Redundancy Relations, ARR) que servirão como base para o resultado da pesquisa.

A partir das próximas seções serão utilizadas as nomenclaturas em português ou as abreviaturas em inglês, obedecendo as referências encontradas.

## **1.1 Motivação de pesquisa**

O lançamento de veículos espaciais apresenta perigos inerentes e a falha de algum sistema pode provocar danos a propriedade, ao ambiente e a vida. Deve-se a isso a importância desse trabalho, evitar com antecedência que o servomotor falhe e provoque algum acidente já que este é responsável por seu controle de trajetória.

Quando equipamentos críticos estão sujeitos a situações severas de uso é importante manter a sua operabilidade. Este trabalho visa fazer a detecção e isolamento de falhas do servomotor responsável pela vetorização do empuxo de um veículo lançador de satélites.

Com a compreensão do funcionamento deste procedimento, a integração com outros sistemas será simplificada e assim justificará o estudo inicial e aplicação em outros procedimentos estratégicos, dentro do próprio Centro de Lançamento de Alcântara.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Com base no procedimento de isolamento e detecção de falhas proposto, analisar o comportamento, quanto à falha, do servomotor hidráulico responsável pelo controle do vetor de empuxo (CVE) de um veículo lançador de satélite (VLS) controlado.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar uma representação em Grafos de Ligação no software 20-sim do modelo do servomotor com suas características próximas da realidade;
- Analisar o estudo da detecção e isolamento das falhas para o estudo proposto, tais como a análise de redundância analítica e a matriz de falha que será resultado desse estudo;
- Analisar possíveis falhas através do deslocamento angular da palheta, deslocamento linear do carretel da válvula camisa-carretel e do pistão hidráulico;
- Com o estudo da metodologia, indicar a integração com outros sistemas do foguete ou outros equipamentos do Centro de Lançamento de Alcântara.

## 2 Estado da Arte

Por se tratar de um tema que levanta questões como a de segurança e soberania nacional de países, não foram encontrados artigos correlatos ao mesmo sistema em questão com abordagens diferentes de detecção e isolamento de falhas para que se pudesse elaborar uma boa comparação para o posicionamento do trabalho diante de uma referência internacional. Apesar disso, o trabalho pôde ser validado e verificado ao o compararmos diretamente com os dados do servomotor testado no IAE.

Com o desenvolvimento de tecnologias, a complexidade dos sistemas industriais se tornou inegável e a busca por melhores taxas de segurança provocou um crescente interesse pelo desenvolvimento de procedimentos de diagnóstico de falhas.

O objetivo geral de um procedimento de diagnóstico consiste na detecção de falhas e isolamento tão rapidamente quanto possível. A maioria das abordagens de Detecção e Isolamento de Falhas depende principalmente do conjunto de indicadores de falhas, [6].

O foco atual da pesquisa nessa área é a robustez [14]. Diferentes abordagens foram desenvolvidas para projetar e implementar procedimentos robustos de FDI. Esses métodos dependem do tipo de conhecimento usado para descrever a operação da planta. Eles podem ser categorizados em dois grupos, definidos em [3]:

- **Métodos que não usam modelos explícitos da planta e seus comportamentos**

Essas abordagens são baseadas em técnicas de inteligência artificial derivadas do conhecimento de especialistas ou de esquemas orientados a aprendizado de máquina, que derivam relações associativas ou matemáticas entre as falhas e seus efeitos observados, além de métodos estatísticos de análise de sinais que incluem métodos neurais e neuro-fuzzy. As abordagens mais populares de monitoramento de processos orientados a dados incluem análise de Componentes Principais (PCA), análise discriminante de Fisher, análise de mínimos quadrados parciais (PLS) e análise de variáveis canônicas [35]. Esses métodos dependem apenas de dados de bancos históricos, contudo, a ausência dessas informações compromete a capacidade de localizar e isolar falhas do sistema. Além disso, todos esses métodos que não usam modelos explícitos geralmente não possuem generalidade e robustez devido a variações desconhecidas nos parâmetros do sistema e não

estacionariedade do sistema (ou seja, os comportamentos do sistema podem mudar em diferentes regiões operacionais).

- **Métodos que empregam modelos analíticos e estruturais da planta e seus comportamentos**

Esses métodos, chamados métodos de diagnóstico baseados em modelo, são baseados em diferentes paradigmas de modelagem, como relação de redundância analítica (ARR) e métodos baseados em observação. Todos esses métodos partem de um modelo dinâmico captura comportamentos nominais e defeituosos no sistema. O desenvolvimento do modelo influencia na precisão geral do diagnóstico desses métodos. Os principais estudos em FDI foram desenvolvidos em sistemas lineares invariantes no tempo (LTI) tendo uma estrutura teórica e análise bem estabelecida em [11, 2, 6]. Outra abordagem de detecção de falhas é a de sistemas lineares a parâmetros variantes (LPV) exibidas pelos autores [23, 32, 20, 10]. O uso destas técnicas torna os cálculos complicados e trabalhosos para equações diferenciais de alta ordem ou modelos de estado de muitas variáveis. Os métodos baseados em ARR são discutidos em [30, 31, 16]. Para o autor [9, 15], a utilização da modelagem em BG facilita a detecção e isolamento de falhas pela simplificação gráfica do método e dos cálculos envolvidos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a segunda categoria apresentada. A escolha se deve, pois, os modelos analíticos e estruturais produzem resultados com melhor robustez para a detecção de falha pois as equações constitutivas são retiradas diretamente do modelo real, enquanto, em contrapartida a primeira categoria utiliza modelos não explícitos a partir de estimativas reduzindo a sua precisão.

Nesse estudo a abordagem para método FDI proposto é baseado na modelagem do servoatuador em grafos de ligação o que é adequado pois existe integração de vários sistemas multi-físicos [16]. A modelagem BG é um método sistemático para modelar sistemas dinâmicos de diferentes domínios de energia, como elétrica, mecânica e sistemas hidráulicos, em uma estrutura unificada, [22, 3, 18]. Essa modelagem permite benefícios como a análise de processos causais e comportamentais [8, 3] além de demonstrar ser uma ferramenta gráfica bem adaptada para o diagnóstico [17, 6, 41, 27, 28].

O uso dessa modelagem permite derivar modelos analíticos, eliminando as variáveis desconhecidas e gerando ARRs e consequente matriz de falha. A partir das próximas seções

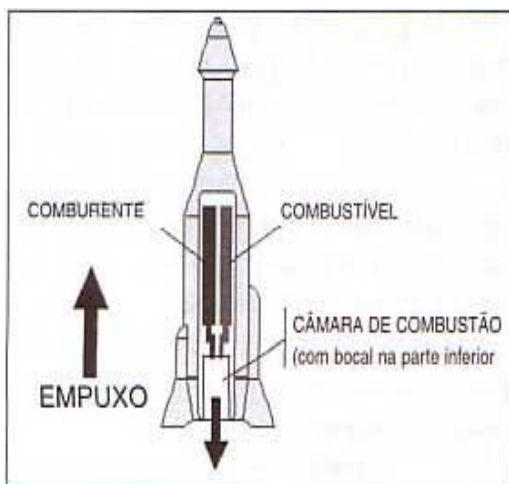
serão apresentadas algumas definições que servem de embasamento para apresentar o método de Detecção e Isolamento de Falhas que será utilizado no modelo do servoatuador hidráulico proposto em [15].

## 2.1 Empuxo

Atualmente, o único meio de transporte que leva cargas e pessoas ao espaço são os veículos espaciais, para que sejam lançados, eles devem produzir um empuxo maior do que seu próprio peso. O empuxo é a força desenvolvida pela queima do propelente nos motores do foguete [21], representado na Figura 2.1. Tratando-se de uma grandeza vetorial definida por magnitude, direção e sentido.

Essa queima ocorre na câmara de combustão e representa a força de maior magnitude atuante no foguete. Os produtos dessa combustão química resultam em gases quentes que são expandidos na tubeira e acelerados a grandes velocidades que impulsionam o foguete na direção contrária dos gases como produto de uma força de reação [24].

Figura 2.1 - Representação Empuxo.



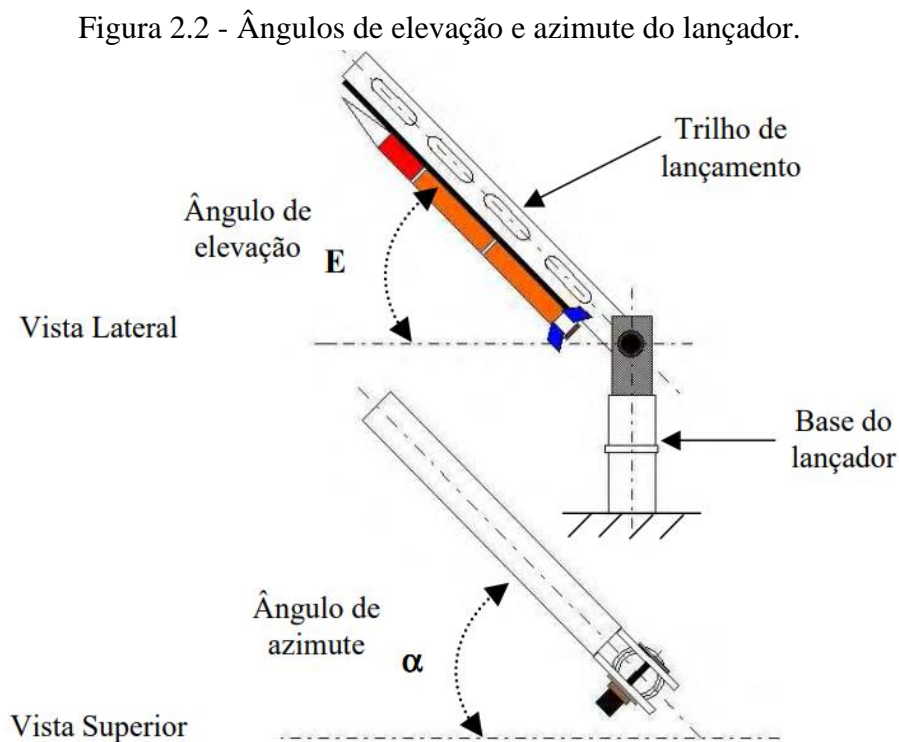
Fonte: [24, 29]

## 2.2 Foguete controlado e não controlado

Como já foi definido, os veículos espaciais se movimentam pelo empuxo gerado pela queima do combustível na câmara de combustão do foguete. Neste estudo é necessário distinguir como ocorre esse movimento, de acordo com sua controlabilidade.

Os foguetes podem ser classificados pelo tipo de combustível, quantidade de estágios e pela forma como é controlada sua atitude. A atitude de um foguete é definida por sua posição angular no espaço, definida pelo conjunto dos três ângulos: arfagem, guinada e rolamento. Estes ângulos são definidos em relação a um sistema inercial de coordenadas. Nesse contexto, os foguetes podem ser classificados, de acordo com o controle da sua atitude, em não controlados e controlados [21].

Os foguetes não controlados têm sua trajetória definida pelos ângulos de azimute e elevação da rampa de lançamento, nenhum elemento interno auxilia no controle de atitude, Figura 2.2. O ângulo de azimute de lançamento define a direção da trajetória, enquanto, o ângulo de elevação de lançamento define principalmente os parâmetros de apogeu da trajetória e a distância de impacto do foguete [7].



Fonte: [7]



Os foguetes controlados, ao contrário dos anteriormente citados, possuem um sistema de controle vetorial de empuxo (CVE) que corrige a trajetória para uma previamente definida quando ocorre alguma perturbação.

A adição desse sistema aumenta o custo do foguete e o prazo de desenvolvimento, portanto só se justifica pela aguda necessidade da missão. Por esse alto custo, é importante que o processo seja seguro e que garanta proteção a vida e bens materiais, isso só é possível quando há meios de evitar falhas no processo [21].

O controle desses foguetes é obtido por meio de atuadores que mudam sua direção e criam um torque em torno do CG do veículo lançador. No presente estudo, esse sistema é formado por servoatuador hidráulico que converte energia hidráulica em mecânica com o intuito de gerar um deslocamento por meio de um pistão que movimenta a tubeira e modifique o vetor empuxo, a fim de manter o controle de trajetória.

## **2.3 Supervisão de processos e sistemas multifísicos**

A fim de evitar danos ou acidentes é necessário a supervisão constante de um processo industrial, de um sistema ou componente. Nesse âmbito, a supervisão mostra o presente estado do equipamento estudado, incluindo os estados não desejados e não permitidos. Esses estados anormais podem resultar em períodos de mau funcionamento do sistema ou até mesmo falhas, caso nenhuma decisão seja tomada.

### **2.3.1 Mau Funcionamento, Faltas e Falhas**

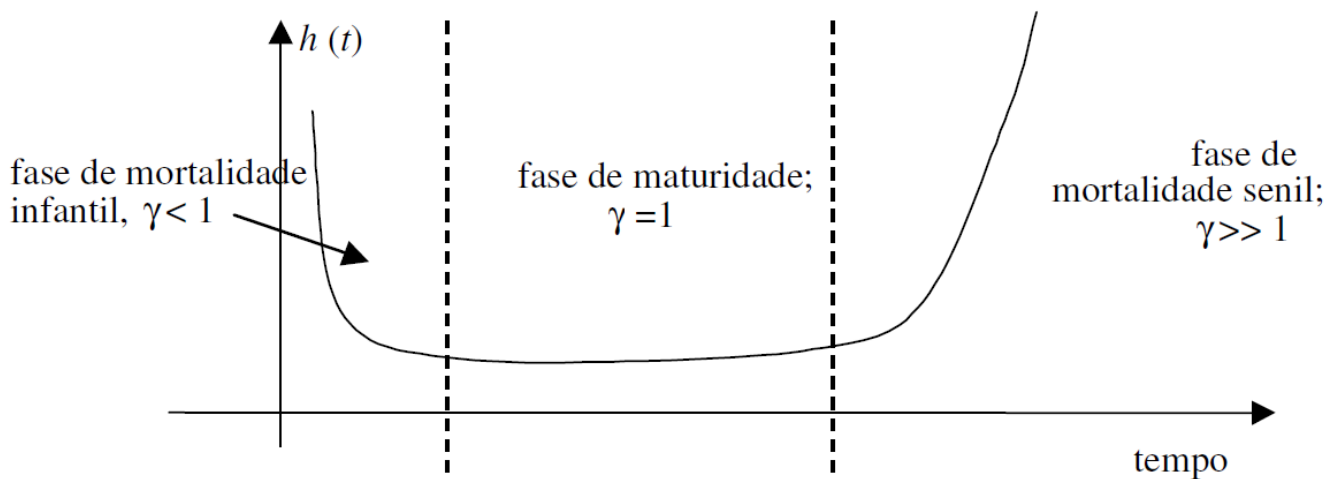
Para detecção e isolamento de falhas é importante diferenciar os problemas que ocorrem em determinado sistema e provocam a interrupção de uma atividade, são eles: mau funcionamento, faltas e falhas.

Mau funcionamento é definido como uma irregularidade intermitente na execução da função desejada do sistema, enquanto que, falta é um desvio não permitido de pelo menos uma característica do sistema a partir do aceitável, usual, ou condição padrão e, por último, falha é uma interrupção permanente da habilidade do sistema em executar uma determinada função sob certas condições de operação [11].

Como pode ser observado anteriormente, falhas são mais prejudiciais ao sistema pois provocam interrupções permanentes que impedem o sistema de executar suas tarefas. Uma forma de analisar o comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo é por uma curva de representação que lembra uma banheira, como na Figura 2.3.

A curva representa as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. Como se pode observar na Figura 2.3, a taxa de falha é alta mas decrescente na primeira fase até conseguir se manter baixa e estável na fase de maturidade e reiniciar o crescimento da taxa na última fase.

Figura 2.3 - Curva da Banheira e ciclo de vida.



Fonte: [34]

## 2.4 Modelos de Sistema

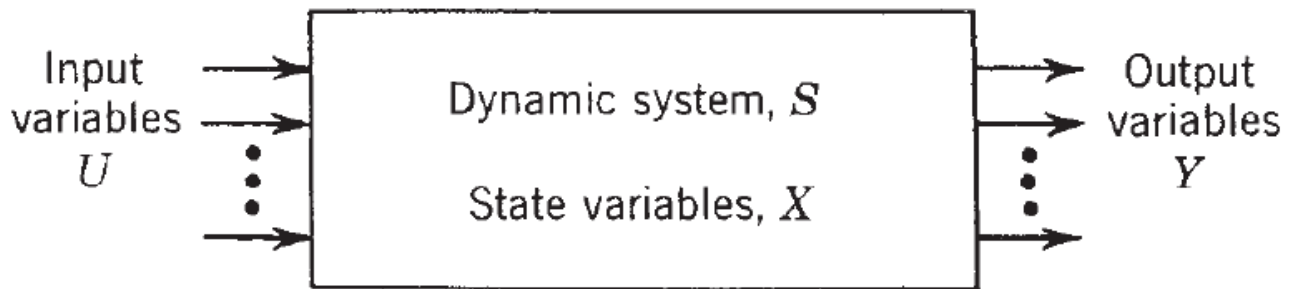
O servoatuador hidráulico responsável pela vetorização do empuxo é um dos componentes do sistema de controle do veículo lançador.

Sistema é a coleção de matéria, partes ou dispositivos que atuam interagindo entre si, dentro de uma fronteira física ou conceitual especificada, realizando uma determinada função ou finalidade [9].

A fim de facilitar o estudo do comportamento de um equipamento, eles podem ser representados por modelos. Na Figura 2.4 é possível visualizar um esquema de modelo geral de sistema dinâmico. O sistema  $S$  é caracterizado por um conjunto de variáveis de estado, indicadas por  $X$ , que são influenciadas por um conjunto de variáveis de entrada  $U$  que

representam a ação do ambiente do sistema no sistema ou variáveis que poderiam ser manipuladas por um sistema de controle. O conjunto de variáveis de saída  $Y$  são efeitos de retorno do sistema no ambiente ou variáveis que podem ser detectadas e usadas por um sistema de controle.

Figura 2.4 - Representação genérica de Sistema.



Fonte: [13]

Para [13], modelos de sistemas são construções simplificadas e abstratas usadas para prever seu comportamento, enquanto [9], define que são representações das interações de sinais e dos relacionamentos causas-efeitos para os sistemas que representam. Eles podem ser classificados em modelos físicos em escala, matemáticos e até gráficos como Grafos de Ligação

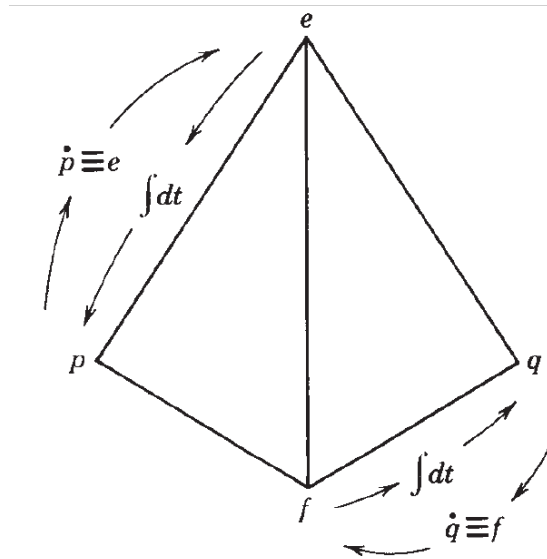
No contexto do presente estudo, os modelos são representados em uma abordagem gráfica em Grafos de Ligação, definido na seção a seguir.

## 2.5 Grafos de Ligação (BG) e o software 20-sim

Nesta dissertação a representação do servomotor do sistema de controle será feita em Grafo de Ligação modelado no software 20-sim. Um BG é uma abordagem gráfica que consiste em interligar subsistemas por linhas que representam as ligações de potência e energia, independente de domínio. Foi criado por Henry M. Paynter (MIT), 1959.

A representação das relações das variáveis de potência e energia pode ser mostrado em um tetraedro nomeado como tetraedro de estado [13], Figura 2.5. Esse tetraedro mostra os quatro tipos de variáveis utilizadas nos modelos físicos em seus vértices, são eles: esforço ( $e$ ), fluxo ( $f$ ), momento ( $p$ ) e deslocamento ( $q$ ).

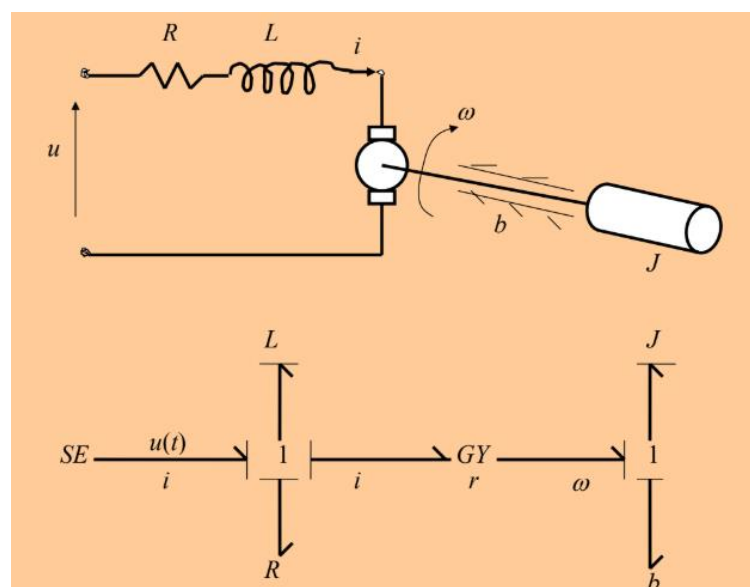
Figura 2.5 - Tetraedro de estado



Fonte: [13]

De acordo com [13], como os modelos podem ser concebidos numa mesma notação para todos os tipos de sistemas físicos é possível fazer analogias e construir modelos de sistemas elétricos, magnéticos, mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, térmicos e outros, usando apenas um pequeno conjunto de elementos ideais, como ilustrado na Figura 2.6. A partir desse tipo de modelagem, técnicas permitem que os modelos sejam traduzidos em equações diferenciais ou esquemas de simulação computacional.

Figura 2.6 - Motor DC em Grafo de Ligação (BG).



Fonte: [9]

Cada seta do grafo de ligação é uma interação energética de elementos generalizados interconectados que transporta fluxo ou esforço. Os elementos básicos que compõem o Bond Graph são as fontes de Fluxo (SF) e Esforço (SE), Armazenador de Fluxo (C), Armazenador de Esforço (I), Dissipador (R), Transformador (TF), Girador (GY) e as junções 0 e 1.

A modelagem em Grafos de Ligação apresenta notórias vantagens, sendo elas [13, 9]:

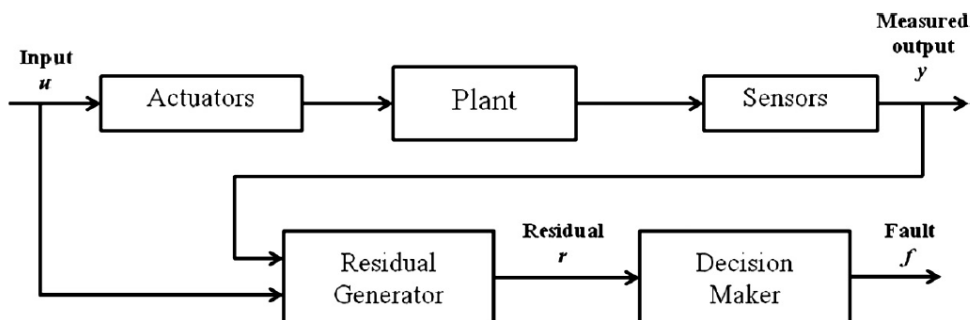
- Fornece uma representação gráfica unificada das trocas de energia entre subsistemas físicos, melhorando a compreensão física dos componentes e de suas interações em um sistema complexo.
- Colocam em evidência os problemas de causalidade e, portanto, os problemas numéricos e a estimação da dinâmica do modelo;
- Pode determinar leis de controle a partir de modelos simplificados.
- Simulações computacionais podem ser realizadas a partir do grafo de ligações do sistema (isto é, sem a explicitação do modelo matemático).

Pelo o que foi exposto esse tipo de modelagem apresenta ferramentas simples para o estudo de sistemas complexos e multi-físicos o que se adequa ao presente estudo que terá parte do seu desenvolvimento no software 20-sim que é responsável por fazer as simulações computacionais.

## 2.6 Relação de Redundância Analítica (ARR)

Quando se analisa o comportamento de um modelo através de sensores, pequenas discrepâncias podem ser observadas e pelo método FDI produzir resíduos que identificam os possíveis pontos de falha, isto fica representado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Esquema genérico de diagnóstico de falhas.



Fonte: [3]

Com a exposição dos conceitos de sistema e modelo é possível passar para a definição de ARR. De forma geral, essa relação é resultado de equações constitutivas de determinado elemento que foi submetido a medições de sensores, conseqüentemente, a partir dessas equações obtém-se os resíduos que mostrarão a sensibilidade de cada elemento a falha.

A Relação de Redundância Analítica (ARR) é uma condição derivada de um subsistema e expressa em termos de variáveis conhecidas do processo. Essas condições podem ser estáticas ou dinâmicas vinculadas a evolução temporal das variáveis conhecidas quando o sistema opera de acordo com seu modelo de operação normal [16] e [27].

A detecção de falhas baseados em ARR usam modelos estruturais, como o conjunto de equações de comportamento do sistema, para derivar métodos gráficos bipartidos para o diagnóstico. A tarefa de isolamento de falhas é normalmente reduzida a um processo de tomada de decisão lógica [1].

Teoricamente, o número de ARRs estruturalmente independentes que pode ser obtido a partir do modelo de um sistema é igual ao número de sensores no modelo [30].

Uma vez que o ARR é projetado, o procedimento de detecção de falhas (FD) verifica a cada momento se eles estão satisfeitos ou não, e quando não, o procedimento de isolamento de falhas (FI) identifica o (s) componente (s) do sistema suspeito. Para que o procedimento de FDI funcione adequadamente, o ARR deve ser estruturado, sensível a falhas e robusto, ou seja, insensível a interferências e insumos desconhecidos.

Nesta dissertação foi desenvolvido a lógica para identificação das falhas, assim, esse estudo subsidia, em estudos futuros, a criação de um mecanismo computacional para detecção em tempo real do comportamento do servoatuador.

As ARRs são geralmente sensíveis aos parâmetros conhecidos do sistema (como resistor em um circuito elétrico) e medições (dados do sensor, entradas de controle etc.). Essas relações representam as leis de restrições físicas derivadas do modelo matemático do sistema [12].

A forma geral de um ARR é dada pela seguinte expressão:

$$f(K) = 0 \tag{2.1}$$

onde  $K$  é o conjunto de variáveis e/ou parâmetros conhecidos. Para grafo de ligação, o conjunto de variáveis conhecidas são representadas pelo fluxo  $Df$  e o esforço  $De$  de sensores, o fluxo  $Sf$  e esforço  $Se$  das fontes, o fluxo  $MSf$  e o esforço  $MSe$  de fontes

moduladas, o processo de entradas  $u$  e os parâmetros do processo  $\theta$ ). Assim, a equação 2.1 se torna:

$$f(Df, De, Sf, Se, MSf, MSe, u, \theta) = 0 \quad (2.2)$$

Cada ARR deve ser validada dentro de um determinado limite de erro, quando avaliada usando dados medidos do sistema real. Este erro, que teoricamente é zero durante a operação normal de um processo, denomina-se residual/resíduo. Um resíduo,  $r$ , é a avaliação numérica que representa o erro na condição derivada de cada subsistema. Assim, a equação 2.2 se torna:

$$r = f(Df, De, Sf, Se, MSf, MSe, u, \theta) = 0 \quad (2.3)$$

Um residual  $r_i$  é sensível a falhas do componente  $j^{th}$ , se e somente se um (ou mais) parâmetro pertencente ao componente  $j^{th}$  for exibido  $r_i$ , [16].

Como dito anteriormente, o residual é teoricamente igual a zero, contudo, quando envolve medições em aplicações reais ocorre uma pequena variação, isso ocorre devido aos ruídos do sensor e às incertezas nos parâmetros. A fim de evitar falsos alarmes ou a não detecção de falha um vetor de coerência é calculado sendo comparado ao resíduo obtido e a sua lógica contribuirá para a validação dos dados num mecanismo computacional.

Resíduos levam à formulação de um vetor de coerência binária  $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ , cujos elementos,  $c_i (i=1..n)$ , são determinados a partir de um procedimento de decisão que gera condições de alarme. Usando um procedimento de decisão simples,  $C = \Theta(r_1, r_2, \dots, r_n)$ , pelo qual cada resíduo,  $r_i$ , é testado em relação a um limiar,  $\varepsilon_i$ , fixado a priori obedecendo as seguintes condições[16, 5]:

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{se } |r_i| > \varepsilon_i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.4)$$

O vetor de coerência é calculado em cada etapa de amostragem. Uma falha é detectada quando  $C \neq [0, 0, \dots, 0]$ , ou seja, pelo menos um elemento do vetor de coerência é diferente de zero (alternativamente, pelo menos um residual excedeu seu limite). O valor escolhido de

$\varepsilon_i$  não deve ser muito alto para evitar os alarmes perdidos (não detecção), nem muito pequeno para evitar os falsos alarmes [16].

Com a obtenção dos resíduos é possível construir a matriz de falha. A assinatura de falha de cada componente é obtida da matriz binária  $S_{ij}$  construída a partir da estrutura dos resíduos sendo obtido usando as seguintes condições:

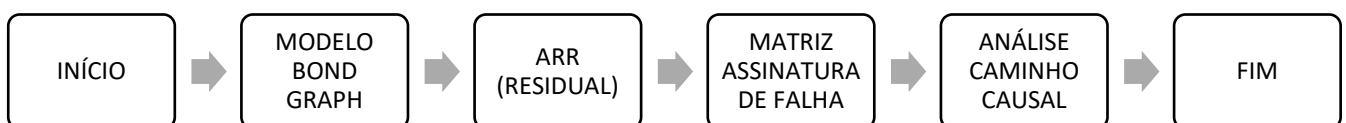
$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o residual } i^{\text{th}} \text{ é sensível a falhas no componente } j^{\text{th}} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.5)$$

A matriz  $S_{ij}$  fornece a lógica para o isolamento de falha do processo, com a detecção da falha, cada componente do sistema tem uma assinatura correspondente e a condição para que a falha seja isolável é se, e somente se, sua assinatura for única, ou seja, com assinaturas diferentes de todos os outros componentes [16, 5].

Nesta dissertação, como dito anteriormente, será utilizada uma abordagem gráfica, por Grafos de ligação na plataforma 20-sim. Essa modelagem gráfica multidisciplinar é adequada e eficiente para representar sistemas multi-energéticos e que, além disso, tem sido amplamente utilizado para gerar indicadores de falhas de forma sistemática e genérica, [12].

O fluxograma mostrado na Figura 2.8 esquematiza o processo que será utilizado na metodologia deste estudo.

Fluxograma 2.1 - Método FDI com ARR



Fonte: [27 - adaptado]

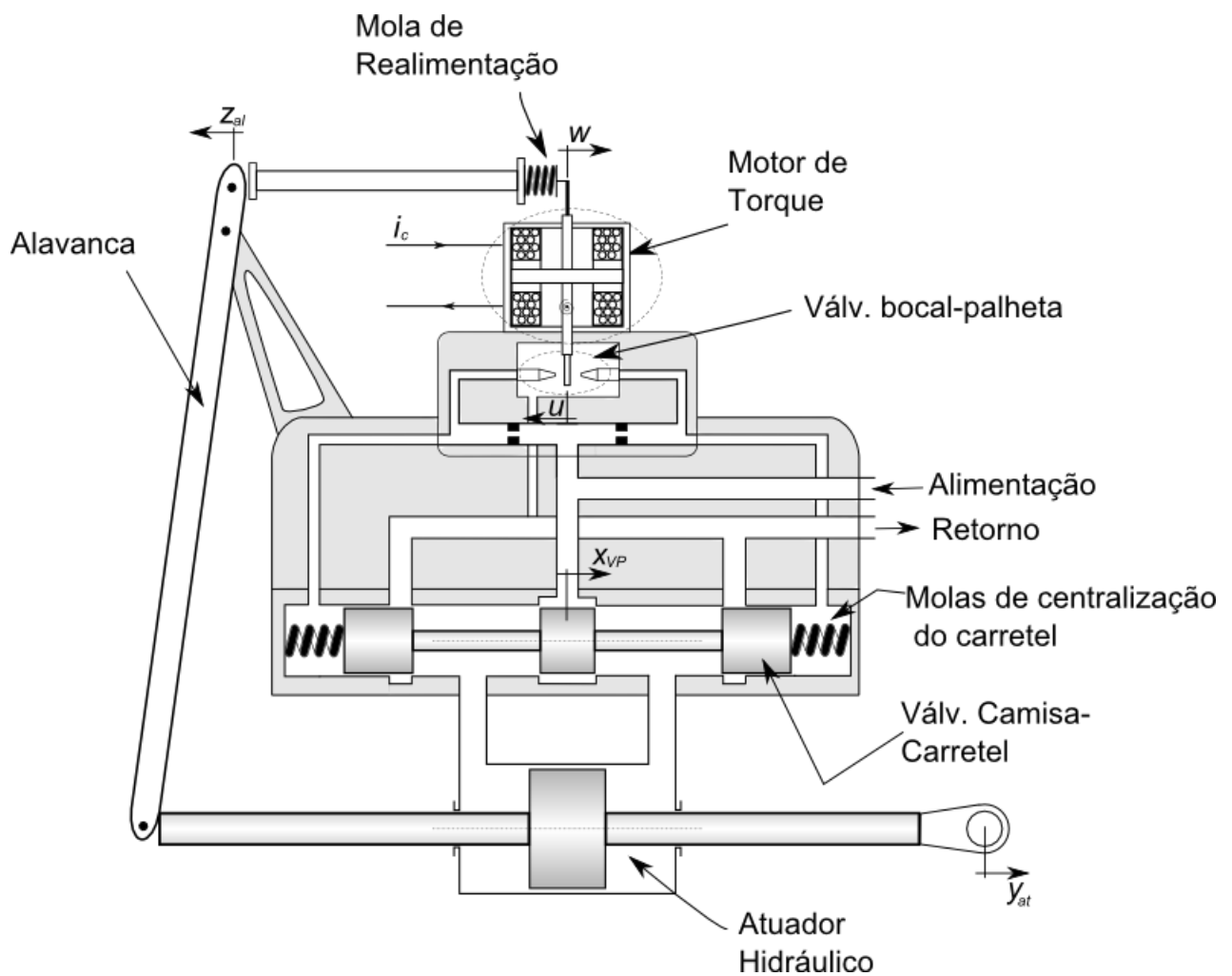
## 2.7 Servoatuador

Nesta seção será apresentado o servoatuador modelado em [15]. O servoatuador é composto de três sistemas principais: servoválvula eletro hidráulica, atuador hidráulico e mecanismo de realimentação, como pode ser observado na figura 2.8.



A servoválvula eletro hidráulica é composta por um motor de torque elétrico, válvula bocal-palhetas e uma válvula camisa-carretel de quatro vias. Esse componente possui um sistema mecânico de realimentação negativa do deslocamento  $y_{at}$  do pistão hidráulico, necessária ao controle da posição do pistão hidráulico. O atuador hidráulico é composto por um pistão hidráulico simétrico onde as áreas dos dois lados do pistão são iguais enquanto o mecanismo e realimentação é composto por uma alavanca e uma mola, como é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Esquema do servoatuador.



Fonte: [15]

A forma como o servoatuador opera é descrito em [15] da seguinte forma:

- 1) Um determinado valor de corrente de comando  $i_c$  produz um torque magnético no motor de torque, o que provoca um deslocamento angular na palheta no sentido horário, por exemplo.
- 2) O deslocamento da ponta da palheta entre os bocais da válvula bocal-palheta para a esquerda, aumenta a pressão no bocal esquerdo e reduz a pressão no bocal direito. O bocal esquerdo da válvula bocal-palheta controla a pressão da câmara lateral esquerda da válvula camisa-carretel e o bocal direito controla a pressão da câmara lateral direita, conforme observado na Figura 2.8.
- 3) A força de deslocamento resultante dessa diferença de pressão é aplicada sobre o carretel da válvula camisa-carretel, deslocando-o para a direita. Essa força é equilibrada pelas molas de centralização presentes nas laterais do carretel, também mostradas na Figura 2.8.
- 4) Observando-se a Figura 2.8, ao ter o carretel deslocado da posição central para a direita, a válvula camisa-carretel conecta a câmara esquerda do atuador hidráulico à linha de pressão de alimentação do servoatuador e conecta o lado direito do atuador hidráulico à linha de retorno do servoatuador. Por isso, ocorre entrada de fluido hidráulico da linha de alimentação do servoatuador para a câmara esquerda do atuador hidráulico e saída de fluido hidráulico da câmara direita do atuador hidráulico para a linha de retorno o que desloca o pistão hidráulico para a direita, no sentido da extensão.
- 5) A extremidade inferior da alavanca acompanha o movimento do pistão hidráulico para direita. A extremidade da alavanca oposta ao pistão hidráulico é deslocada para esquerda, o que, por meio da mola de realimentação, resulta em torque com sentido anti-horário aplicado sobre a palheta, em oposição ao torque magnético do motor de torque.
- 6) Quando o torque causado pela mola de realimentação anula o torque magnético do motor de torque, a palheta retorna para a posição central.
- 7) Com a palheta na posição central, as pressões das câmaras esquerda e direita da válvula camisa-carretel ficam iguais. O carretel então é retornado à posição central por meio das molas de centralização, fechando a válvula camisa-carretel. Isso cessa a vazão de fluido hidráulico para o atuador hidráulico, interrompendo o movimento do pistão. Dessa forma, por meio do equilíbrio de torques sobre a palheta, é obtido que  $y_{at}(t)$  seja proporcional à  $i_c$ , em regime permanente.

### 3 Modelagem do Servoatuador

Nessa seção, será desenvolvida a modelagem em BG para o servoatuador proposto na Figura 2.8. Como dito anteriormente, a modelagem em BG é muito utilizada ao representar sistemas físicos compostos por vários domínios tais como domínio mecânico, hidráulico, elétrico e outros, possibilitando a criação de modelos dinâmicos de sistemas complexos de forma bastante intuitiva, atendendo os requisitos para esta pesquisa devido à natureza do próprio servoatuador.

Essa modelagem foi desenvolvida em [15] que considerou que o sistema de alimentação mantém a pressão de alimentação de fluido hidráulico constante, isto é, não é incluso nenhum comportamento dinâmico resultante de regulação de pressão por parte do sistema de alimentação de fluido hidráulico.

Fisicamente, esse servoatuador possui como entrada a corrente elétrica de comando  $i_c$  e como saída o deslocamento linear do pistão hidráulico  $y_{at}$ .

Como toda a modelagem foi desenvolvida em [15], nas seções posteriores serão apresentados os elementos dos componentes que integram o sistema do servoatuador e servirão de base para a aplicação da metodologia de detecção de falha e isolamento.

#### 3.1.1 Modelo da Servoválvula Eletrohidráulica

A servoválvula eletrohidráulica é um dos subsistemas que controla o vetor de empuxo do sistema de controle sendo composta por um motor de torque elétrico, uma válvula bocal-palheta e uma válvula camisa-carretel de 4 (quatro) vias, Figura 2.8. Esse sistema é controlado pela corrente elétrica de comando  $i_c$  realizando a interface elétrica com o sistema de controle de atitude do VLS.

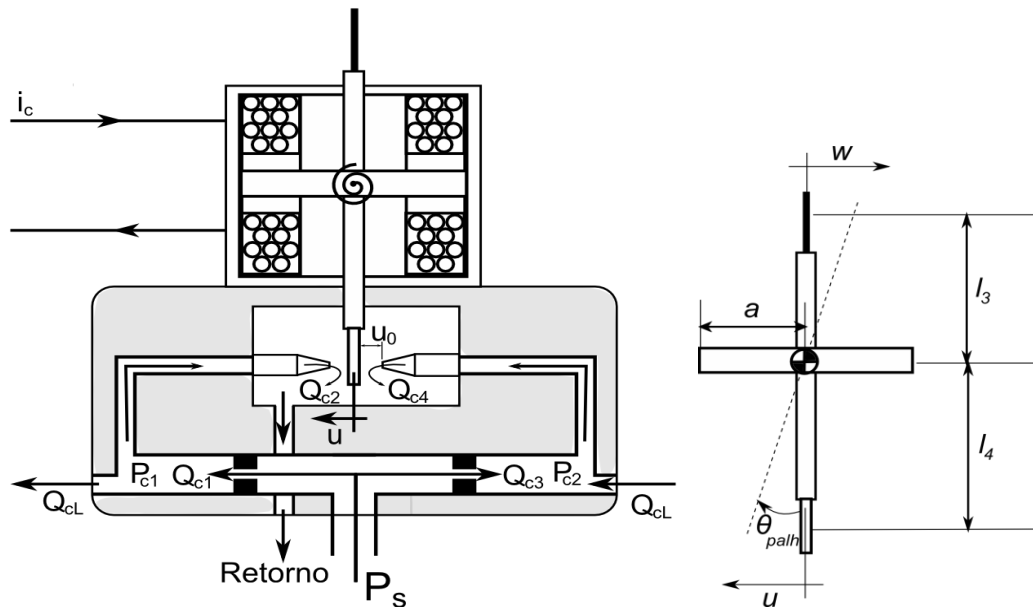
O sistema de controle verifica a vazão de fluido hidráulico para o atuador hidráulico de forma que  $Q_L$  (vazão de carga do atuador hidráulico) seja proporcional à  $i_c$ . Nesse sistema, o motor de torque controla a válvula bocal-palheta, e a válvula bocal-palheta controla a válvula camisa-carretel.

O conjunto motor de torque/palheta possui algumas características para a elaboração do BG, dentre elas: constante de torque magnético do motor de torque ( $K_{mag}$ ), rigidez magnética do motor de torque ( $K_{mmag}$ ), amortecimento viscoso da montagem da palheta no

motor ( $B_{palh}$ ), momento de inércia da palheta ( $J_{palh}$ ) e rigidez equivalente do conjunto motor de torque e válvula ( $K_{mMT}$ ).

A Figura 3.1 apresenta o esquema do conjunto motor de torque elétrico/válvula bocal palheta além de características geométricas da palheta, definidas a seguir.

Figura 3.1 - Esquema do motor de torque e válvula bocal palheta.

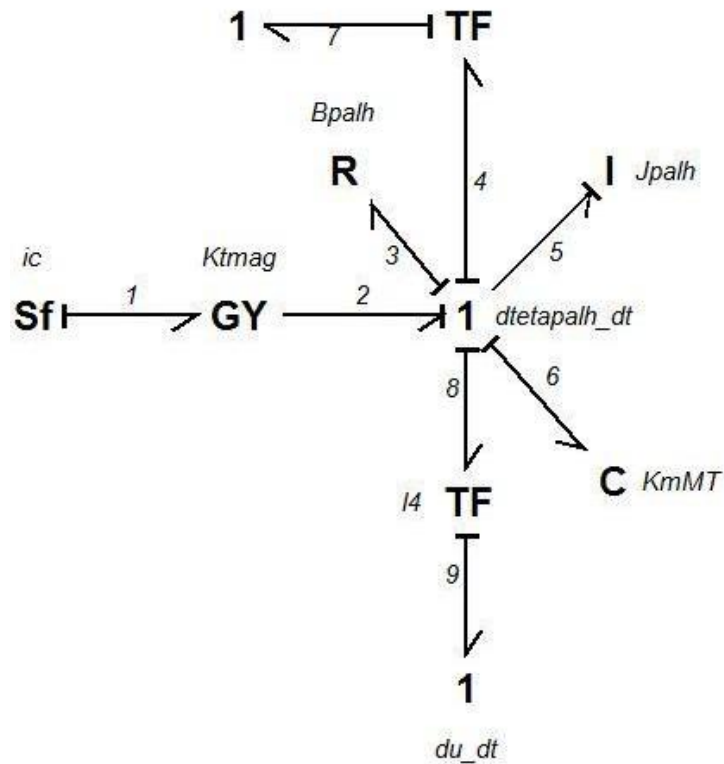


Fonte: [15]

- $w(t)$ : deslocamento linear da extremidade da palheta conectada à mola de realimentação;
- $u(t)$ : deslocamento linear da extremidade da palheta entre os bocais;
- $l_3$ : comprimento entre o pivô da palheta e o ponto onde é aplicada a força de realimentação;
- $l_4$ : comprimento entre o pivô e a linha de centro dos bocais;
- $\theta_{palh}$ : deslocamento angular da palheta.

O modelo em BG do motor de torque e do domínio mecânico da palheta é apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Modelo em BG do motor de torque.



Fonte: [15]

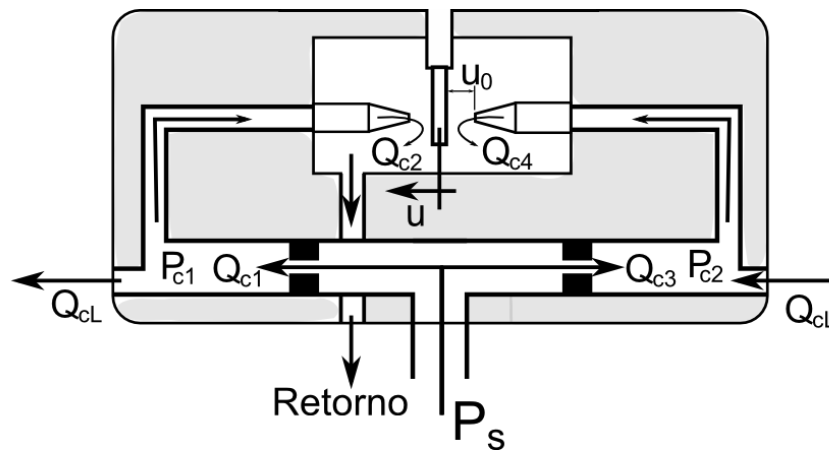
No BG da Figura 3.2, a fonte Sf gera a corrente de comando  $i_c$ . O girador GY:  $K_{mag}$  transforma  $i_c$  (variável de fluxo) em torque (variável de esforço). O elemento  $B_{palh}$  consiste no amortecimento viscoso da montagem da palheta no motor de torque em R, o elemento  $J_{palh}$  trata do momento de inércia da palheta em I,  $K_{mMT}$  corresponde a rigidez equivalente do motor de torque no armazenador C e os transformadores TF :  $l_3$  e TF :  $l_4$  são os braços da palheta.

A palheta da válvula bocal-palheta funciona como a armadura do motor de torque. O motor de torque recebe a corrente elétrica de comando  $i_c$  e provoca o deslocamento angular  $\theta_{palh}$  na palheta.

O deslocamento resultante  $u$  da extremidade da palheta entre os bocais altera as pressões de controle  $P_{c1}$  e  $P_{c2}$  nos bocais da válvula bocal-palheta, ilustrados na Figura 3.1. Essas pressões são iguais às pressões das câmaras laterais de controle da válvula camisa-carretel.

Seguindo na descrição dos componentes do servomotor, a válvula bocal-palhetas controla as pressões das câmaras laterais de controle da válvula camisa-carretel. A Figura 3.3 apresenta o esquema hidráulico da válvula bocal-palhetas.

Figura 3.3 - Esquema hidráulico da válvula bocal-palhetas.



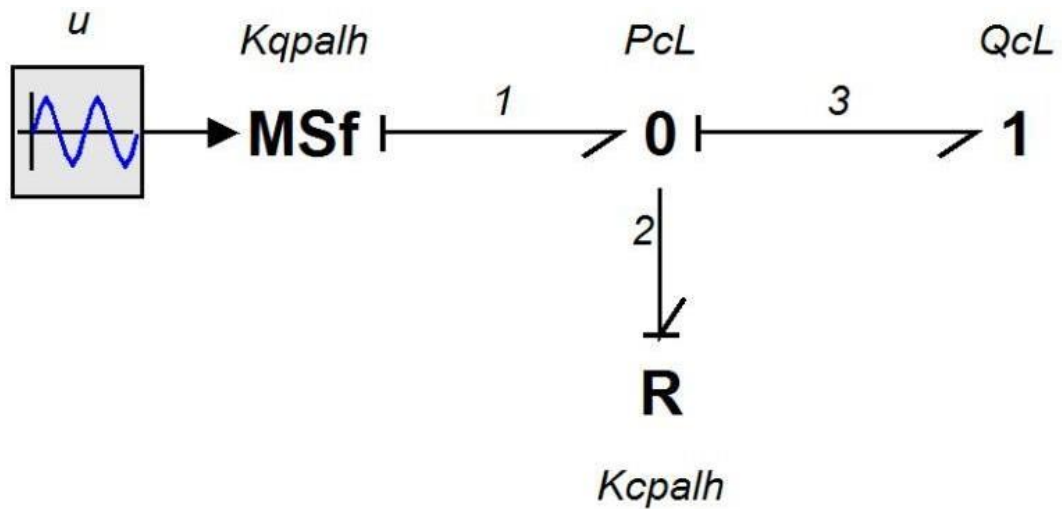
Fonte: [15]

Como descrito em [15], se a palheta for deslocada no sentido horário, a extremidade da palheta se aproxima do bocal esquerdo e reduz a área de passagem de fluido no bocal esquerdo, diminuindo a vazão  $Q_{c2}$  e aumentando a vazão de carga de controle  $Q_{cL}$  para a câmara esquerda da válvula camisa-carretel, que pode ser observado na Figura 3.3 ocorrendo aumento da pressão de controle  $P_{c1}$  no bocal esquerdo. O oposto ocorre no bocal direito da válvula bocal-palhetas.

Com a movimentação da palheta surge uma relação de vazão-deslocamento. Trata-se de um ganho  $K_{qpalh}$  que relaciona a vazão de carga de controle  $Q_{cL}$ , controlada pela válvula bocal-palhetas, ao deslocamento  $u$  da extremidade hidráulica da palheta. O coeficiente vazão-pressão,  $K_{cpalh}$ , relaciona  $Q_{cL}$  à pressão de carga de controle  $P_{cL}$  da válvula bocal-palhetas.

O modelo em BG da válvula bocal-palhetas é apresentado na Figura 3.4,  $K_{qpalh}$  é representado pela fonte de fluxo modulado MSf modulada pelo deslocamento linear  $u$  da extremidade da palheta e  $K_{cpalh}$  é representado pelo dissipador R.

Figura 3.4 - Modelo em BG, domínio hidráulico, para válvula bocal-palha linear.

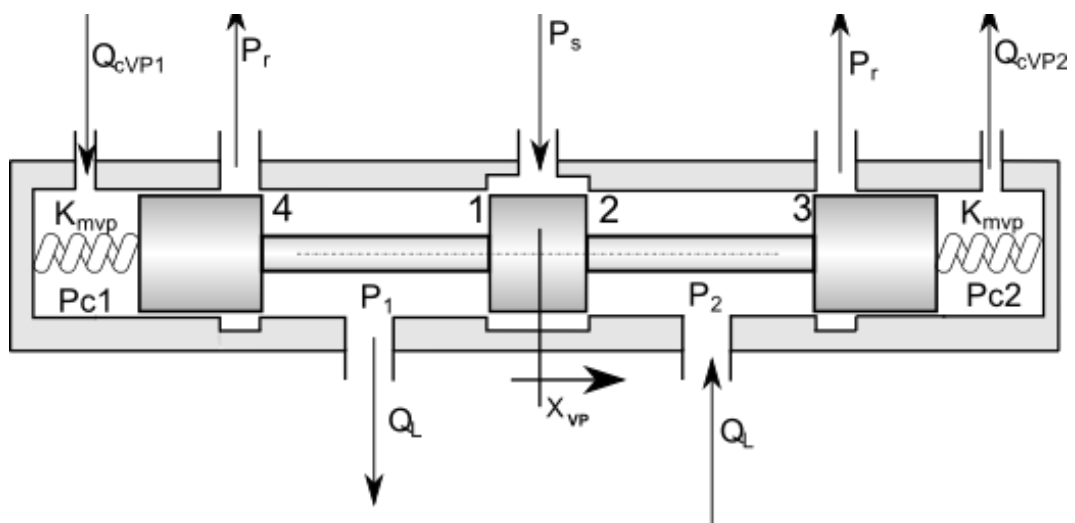


Fonte: [15]

Agora tratando da válvula camisa-carretel da servoválvula, o seu esquema é apresentado na Figura 3.5. Nessa válvula, o carretel se desloca conectando as linhas de alimentação e de retorno do servoatuador a cada uma das câmaras do cilindro hidráulico.

A abertura maior ou menor das portas, em função de  $x_{vp}$ , regula a vazão de fluido hidráulico para o atuador hidráulico de acordo com a potência requerida pelo deslocamento angular da tubeira.

Figura 3.5 - Esquema da válvula camisa-carretel de 4 vias.



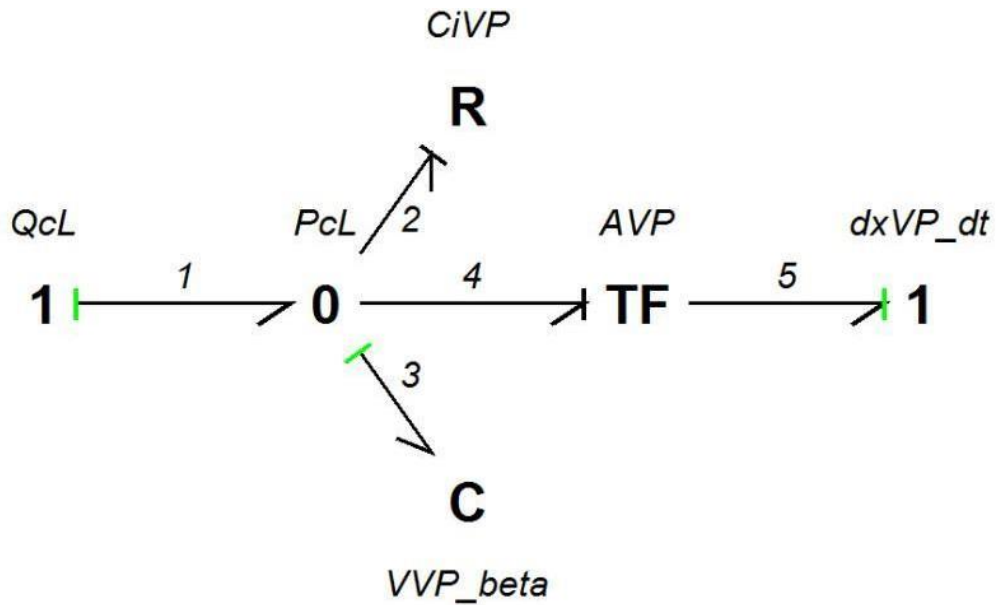
Fonte: [15]





nas câmaras de controle correspondem a  $Ci_{VP}$  em R e o transformador  $A_{VP}$  em TF se refere a área lateral do carretel que transforma a vazão  $Q_{cL}$  em velocidade  $\frac{dx_{VP}}{dt}$  do carretel.

Figura 3.7 - Modelo em BG, no domínio hidráulico, do carretel da válvula camisa-carretel.



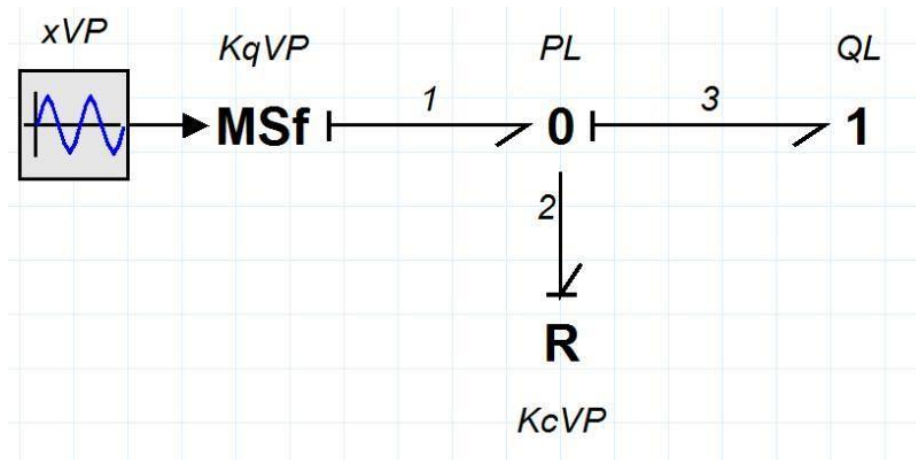
Fonte: [15]

Como visto anteriormente, a válvula camisa-carretel controla a vazão resultante  $Q_L$  do movimento do pistão hidráulico modulado pela abertura e fechamento das portas que a compõem.

O deslocamento  $x_{VP}$  do carretel modula a resposta requerida que será entregue ao atuador, dessa forma, o ganho vazão-deslocamento  $K_{qVP}$  da válvula camisa-carretel relaciona  $Q_L$  com  $x_{VP}$  enquanto  $K_{cVP}$  é denominado coeficiente vazão-pressão da válvula camisa-carretel e relaciona a influência da pressão de carga  $P_L$  entre os dois lados do pistão hidráulico com  $Q_L$ .

O modelo em BG na Figura 3.8 apresenta o modelo linearizado da válvula camisa-carretel em função de  $Q_L$ .

Figura 3.8 - Modelo em BG da válvula camisa-carretel com  $Q_L$  linear.

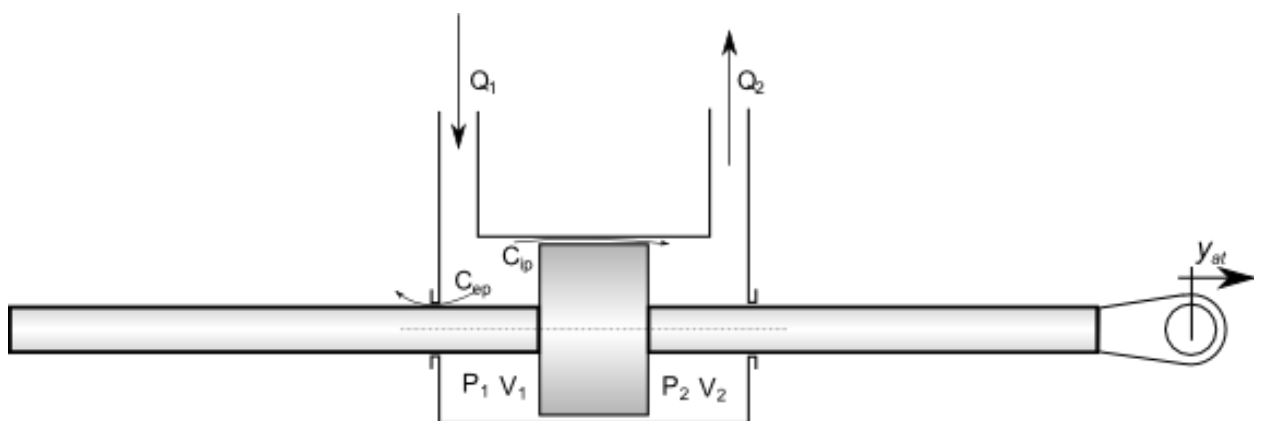


Fonte: [15]

### 3.1.2 Modelo do Atuador Hidráulico

Seguindo na descrição e modelagem dos componentes do sistema, será exposto o atuador hidráulico que é composto por um pistão simétrico e está alojado no cilindro hidráulico como apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Esquema do atuador hidráulico.



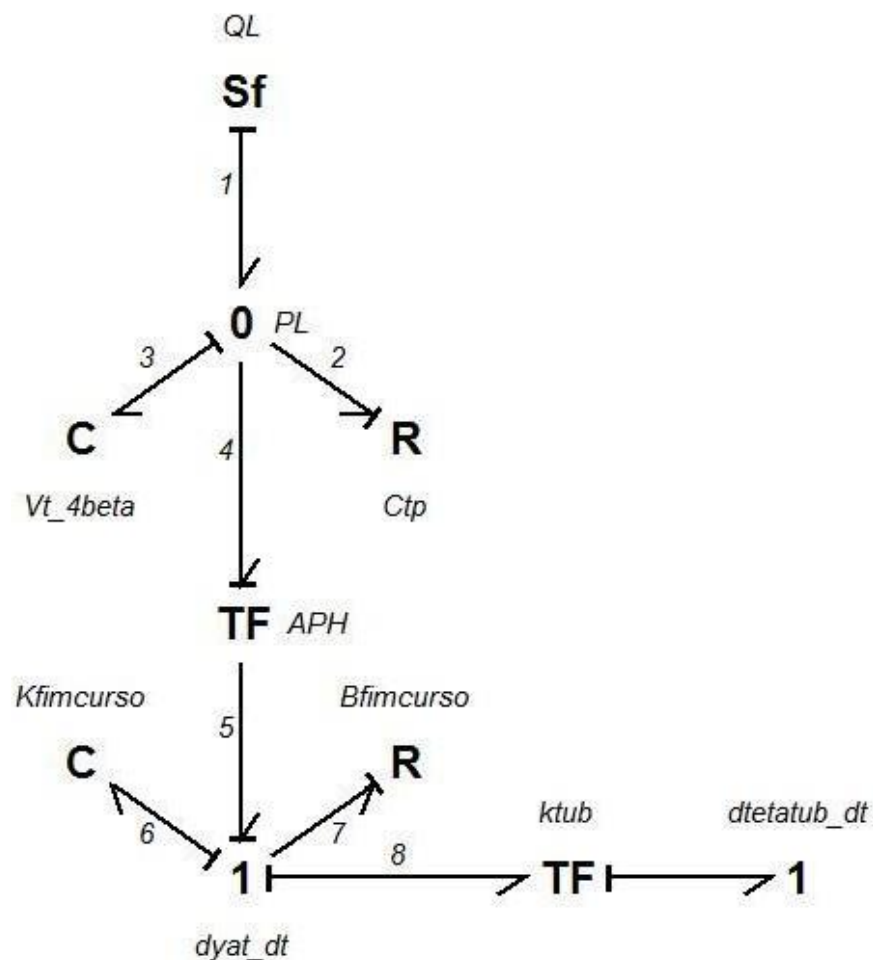
Fonte: [15]

A vazão de carga para o atuador hidráulico  $Q_L$  é resultante do movimento do pistão, dos vazamentos internos e externos do atuador hidráulico e da compressibilidade do fluido hidráulico.

Na Figura 3.10 é exposto o modelo em BG do atuador hidráulico em função de  $Q_L$  e da pressão de carga  $P_L$  entre os dois lados do pistão hidráulico. No domínio hidráulico, elemento  $V_{t\_4beta}$  caracteriza a capacitância fluída para o volume total de fluido no atuador hidráulico,  $C_{tp}$  representa os vazamentos no atuador hidráulico em na junção 0 e o transformador APH corresponde a área do pistão hidráulico em TF.

No domínio mecânico, o elemento  $K_{fimcurso}$  retrata a rigidez estrutural do cilindro hidráulico em C e  $B_{fimcurso}$  trata do amortecimento estrutural em R ambos na junção 1 sendo utilizados para incluir o efeito de fim de curso do pistão.

Figura 3.10 - Modelo em BG do atuador hidráulico, em função de  $Q_L$  e  $P_L$ .



Fonte: [15]

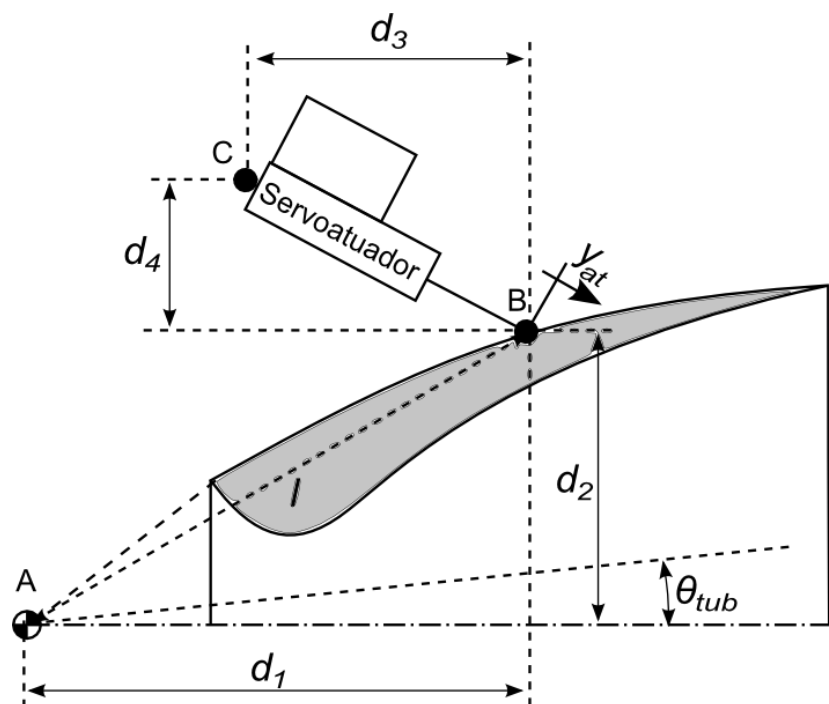
### 3.1.3 Modelo da Carga Movida pelo Servoatuador

Para um veículo lançador, a carga requerida do servoatuador para o sistema é composto pela tubeira acoplada à junta flexível e por torques perturbadores externos, como os provocados pelo escoamento aerodinâmico sobre a tubeira.

O conjunto servoatuador/junta/tubeira formam a tubeira móvel que quando realiza deslocamento angular  $\theta_{tub}$  o atuador hidráulico faz o movimento linear  $y_{at}$ . Nesse caso é importante conhecer a relação entre  $\theta_{tub}$  e  $y_{at}$ , pois, com essa relação o carregamento da tubeira móvel em pode ser transformado um carregamento linear equivalente.

A tubeira móvel pode ser representada pelo esquema da Figura 3.11, [19].

Figura 3.11 - Esquema geométrico da tubeira móvel.



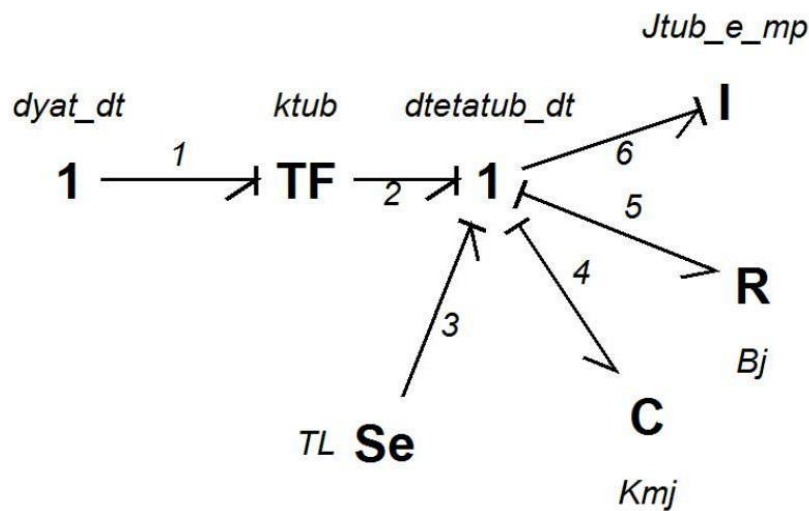
Fonte: [19]

Na Figura 3.11 apresenta os pontos-chave para o deslocamento angular da tubeira:

- A. ponto de pivô da tubeira;
- B. ponto de aplicação da força do atuador;
- C. ponto de fixação do atuador à estrutura do foguete, ponto fixo.

Na Figura 3.12 é apresentado o BG da tubeira móvel, em que o transformador  $k_{tub}$  corresponde a constante proporcional entre o deslocamento angular da tubeira e o deslocamento linear do pistão hidráulico em TF, a indutância  $I$  inclui o momento de inércia  $J_{tub}$  da tubeira e a massa  $m_{tub}$  do pistão hidráulico, o elemento  $K_{mj}$  representa a rigidez da junta flexível em C e o dissipador  $B_j$  representa o amortecimento da junta flexível em R e, por último a fonte  $Se$ :  $TL$  representa os carregamentos provocado por torques perturbadores externos.

Figura 3.12 - BG da tubeira móvel.



Fonte: [15]

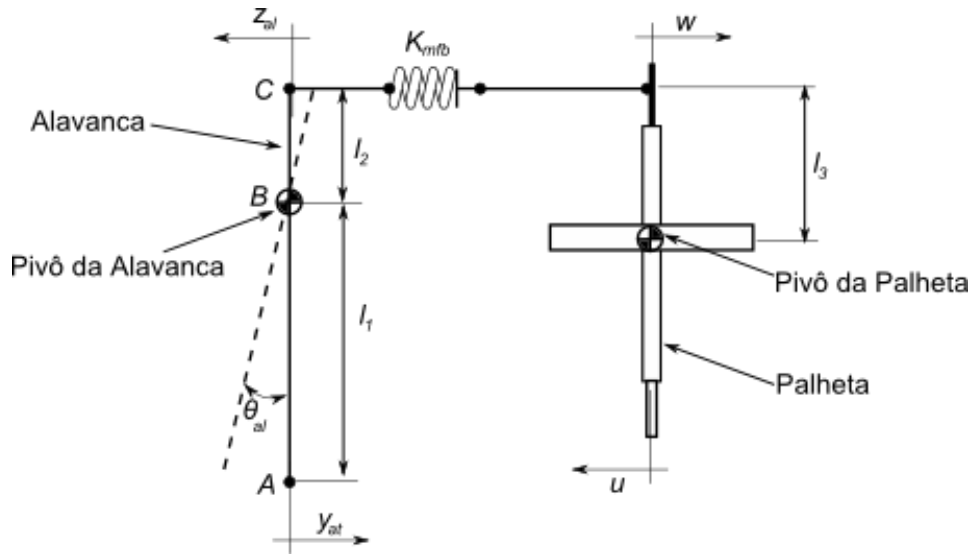
### 3.1.4 Modelo do Sistema Mecânico de Realimentação de Posição

O servoatuador utiliza um sistema de realimentação de posição mecânico, composto por uma alavanca e por uma mola de rigidez  $K_{mfb}$ . O esquema desse mecanismo é mostrado na Figura 3.13.

A geometria da alavanca é caracterizada pelos seguintes parâmetros:

- $l_1$ : distância entre o pivô da alavanca e a extremidade em contato com o pistão hidráulico;
- $l_2$ : distância entre o pivô da alavanca e a extremidade oposta ao pistão hidráulico;
- $z_{al}(t)$ : deslocamento da extremidade menor da alavanca de realimentação;
- $\mathcal{G}_{al}(t)$ : deslocamento angular da alavanca;

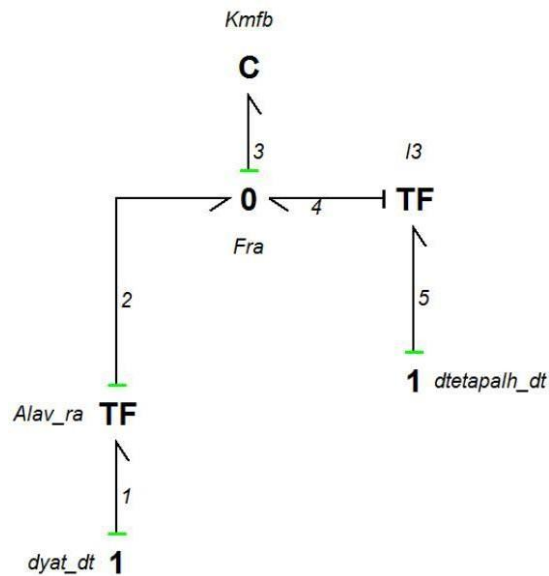
Figura 3.13 - Esquema do sistema de realimentação.



Fonte: [15]

O mecanismo de realimentação é modelado em BG na Figura 3.14. A alavanca é representada pelo transformador Alav\_ra em TF ligado a junção 1:dyat\_dt, a mola de realimentação  $K_{mfb}$  está em C e o transformador  $l_3$  representa a extremidade da palheta conectada à mola  $K_{mfb}$  em TF que está ligado a junção 1:dtetapalh\_dt.

Figura 3.14 - BG do sistema de realimentação



Fonte: [15]

### 3.1.5 Modelo Linear para o Servoatuador

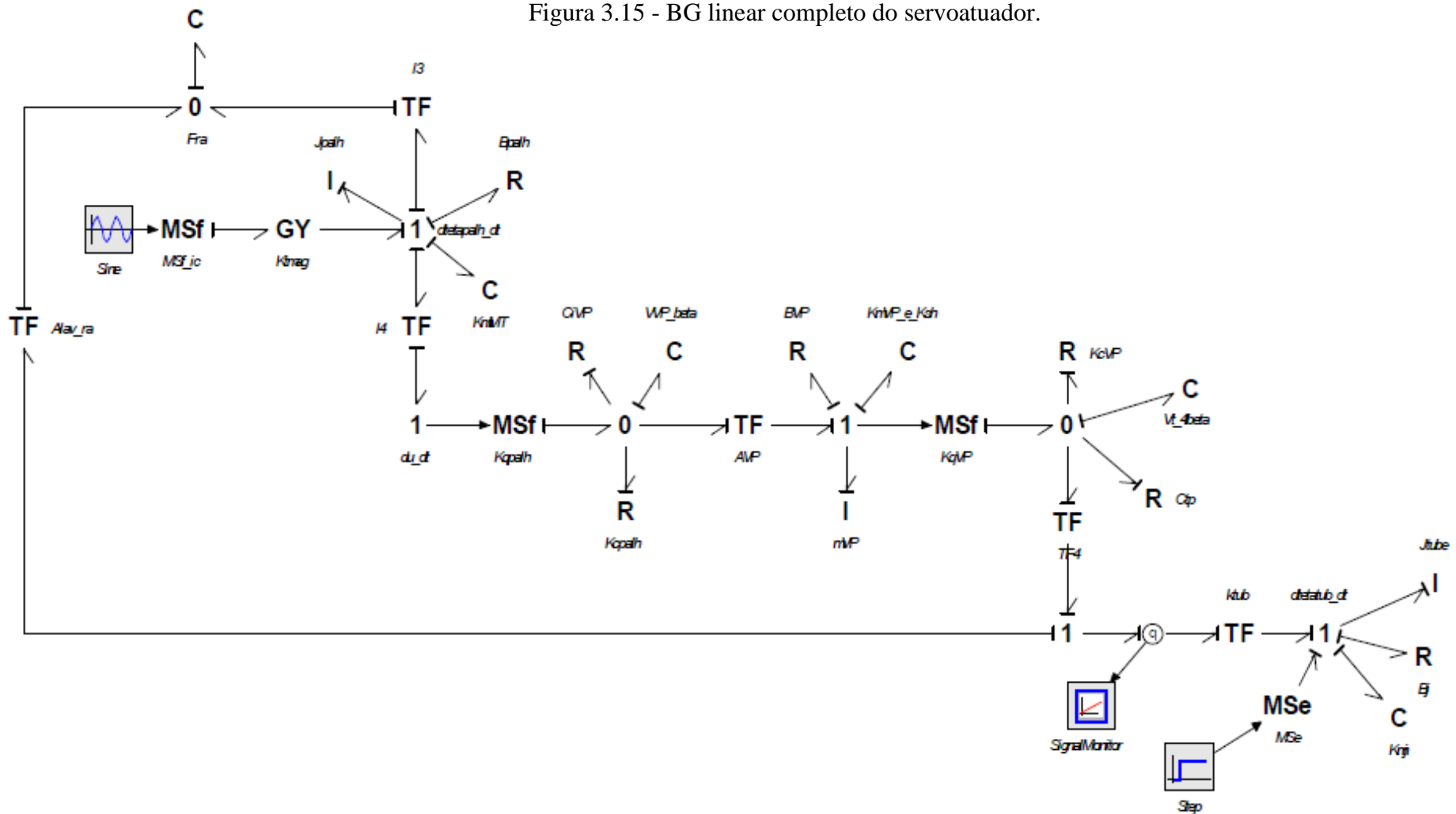
O estudo proposto em [15] trata do desenvolvimento de modelos BG individualizados de cada componente expostos nas seções anteriores, logo depois, os unificou num modelo linear BG para o sistema completo do servoatuador apresentado na Figura 3.15, contudo, ele concluiu que o modelo linear não é suficiente para descrever corretamente o comportamento do servoatuador, devido a umas não linearidades que foi detalhado em seu trabalho, tais como:

- fim de curso do pistão hidráulico;
- válvula camisa-carretel com  $Q_L(x_{VP}, P_L)$  não linear;
- zona morta da válvula camisa-carretel;
- saturação da válvula camisa-carretel;
- atrito seco de Coulomb da junta flexível.

Foi verificado que as não linearidades listadas acima são aquelas cujos efeitos mais aproximam a resposta simulada  $y_{at}$  da resposta medida experimentalmente.

Para a aplicação da metodologia de detecção e isolamento de falhas e execução desse trabalho será analisado o modelo linear da Figura 4.1, com a possibilidade de em trabalhos futuros desenvolver a metodologia em todas as suas não linearidades.

Figura 3.15 - BG linear completo do servoatuador.





## 4 METODOLOGIA

Comparado às abordagens de modelagem convencional, o uso do modelo Bond Graph permite lidar com propriedades de controle estrutural (controlabilidade, observabilidade e invertibilidade) deduzidas das relações de causalidade entre causas e efeitos. Análise de caminhos causais podem identificar problemas na formulação das equações do modelo e problemas do que se pode enfrentar em avaliações numéricas. Além disso, propriedades causais do modelo Bond Graph podem ser usadas para determinar a origem das consequências das falhas [5].

A representação gráfica desse tipo de modelagem também simplifica o desenvolvimento dos cálculos e sequência lógica para o desenvolvimento da detecção de falhas como exposto em [3,5].

Com as definições apresentadas na revisão bibliográfica, é possível trabalhar o modelo desenvolvido em [15] utilizando a sua modelagem em BG linear do servoatuador e desenvolver o método de Detecção e Isolamento de Falhas (FDI) a partir dos passos propostos em [16] para gerar as ARRs que embasam o método FDI e geram a matriz de falha do sistema.

Foram seguidos os passos propostos em [16]:

- Construir o modelo em Grafos de ligação na causalidade integral preferencial (Figura 4.1);
- Colocar o modelo em Grafos de ligação na causalidade derivada preferencial (Figura 4.2);
- Escrever para cada junção suas equações correspondentes;
- Escrever a equação constitutiva para cada elemento gráfico de ligação;
- Elimine as variáveis desconhecidas de cada junção envolvendo um detector (ou um sensor) cobrindo os caminhos causais no modelo gráfico de ligação em causalidade.
- Gerar os ARRs, os resíduos e a matriz de assinatura de falha correspondente.

O número de ARRs gerados é igual ao número de detectores (ou sensores) no modelo gráfico de ligação para um sistema observável e sem alças algébricas não resolvidas.

Como exposto na seção 2.7, o servoatuador é composto de três sistemas principais: servoválvula eletro hidráulica, atuador hidráulico e mecanismo de realimentação e na seção

3.1.5 foi exibido o modelo linear que inicia o primeiro passo proposto em [16]. Após isso, o modelo foi colocado na causalidade derivativa preferencial por meio do software 20-sim como exposto na Figura 4.2.

Nesse modelo os sensores de fluxo foram colocados para identificar as falhas nos componentes referentes ao deslocamento angular da palheta, deslocamento linear do carretel da válvula camisa-carretel e deslocamento linear do pistão hidráulico e a partir disso foram determinadas as equações constitutivas para cada elemento gráfico de ligação.

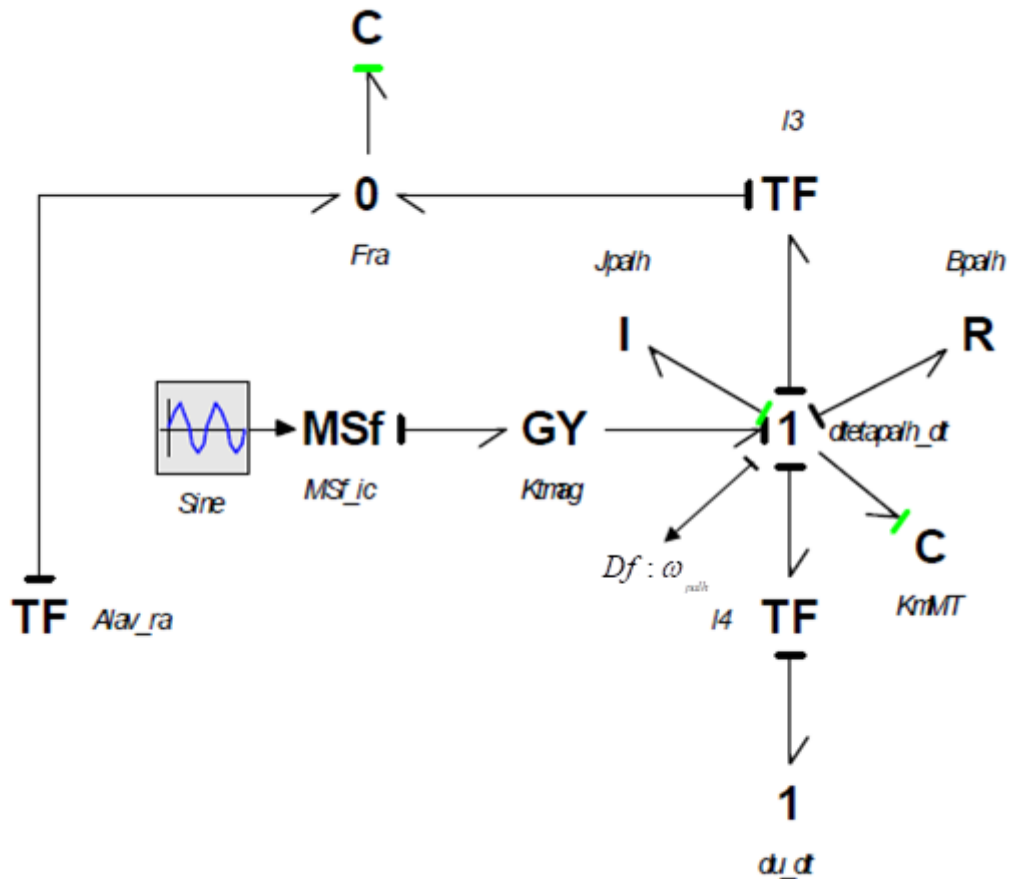




## 5 Formulação e desenvolvimento do método

Para o deslocamento angular da palheta inserida no motor de torque é extraído o modelo da Figura 4.2, com as equações constitutivas sendo desenvolvidas a seguir.

Figura 5.1 - BG para avaliação do sensor  $Df : \omega_{palh}$ .



Fonte: [Autor]

As equações serão mostradas a seguir a partir da exibição do modelo BG de cada componente estudado com causalidade derivativa preferencial.

No modelo em BG da Figura 5.1 para a junção 1 (dtetapalh\_dt), tem-se:

$$f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = f_6 = f_8 = f_{10} = \frac{d\theta_{palh}}{dt} = \omega_{palh} \quad (5.1)$$

$$e_{10} = e_2 - e_3 - e_4 - e_5 - e_6 - e_8 \quad (5.2)$$

Da fonte modulada (MSf:  $i_c$ ), tem-se:

$$f_1 = i_c \quad (5.3)$$

$$e_1 = U_c \quad (5.4)$$

No girador (GY:  $K_{mag}$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} e_2 &= r \cdot f_1 \\ e_2 &= K_{mag} \cdot i_c \end{aligned} \quad (5.5)$$

No dissipador (R:  $B_{palh}$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} e_3 &= B_{palh} \cdot f_3 \\ e_3 &= B_{palh} \cdot \omega \end{aligned} \quad (5.6)$$

No transformador (TF:  $l_3$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} e_4 &= n^{-1} \cdot e_7 \\ e_4 &= (l_3)^{-1} \cdot F_{ra} = \frac{F_{ra}}{l_3} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Na indutância (I:  $J_{palh}$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} e_5 &= I \cdot \frac{df_5}{dt} \\ e_5 &= J_{palh} \cdot \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Na capacitância (C:  $K_{mMT}$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} f_6 &= C \cdot \frac{de_6}{dt} \\ \omega &= K_{mMT} \cdot \frac{de_6}{dt} \\ \int \omega \cdot dt &= \int K_{mMT} \cdot de_6 \\ e_6 &= \frac{\omega \cdot t}{K_{mMT}} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Na junção 1 (du\_dt), tem-se:

$$f_9 = \frac{du}{dt} = v_u \quad (5.10)$$

$$e_9 = 0 \quad (5.11)$$

No transformador (TF:  $l_4$ ), tem-se:

$$e_8 = (l_4)^{-1} \cdot e_9 = 0 \quad (5.12)$$

Com a determinação dos os esforços, o primeiro ARR vem da equação de junção à qual o detector de fluxo  $Df : \omega_{palh}$  pertence, sendo desenvolvido na equação 5.2.

$$e_{10} = e_2 - e_3 - e_4 - e_5 - e_6 - e_8$$

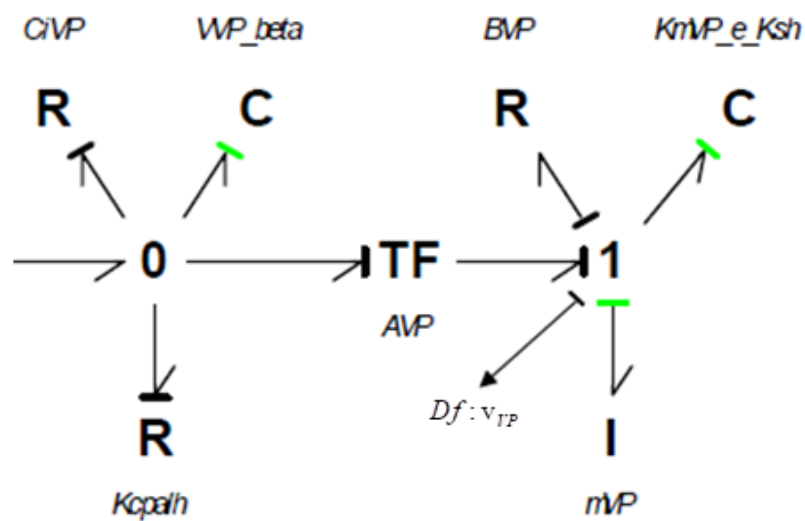
$$ARR_1 : K_{mag} \cdot i_c - B_{palh} \cdot \omega - \frac{F_{ra}}{l_3} - J_{palh} \cdot \frac{d\omega}{dt} - \frac{\theta_{palh}}{K_{mMT}} - 0 = 0 \quad (5.13)$$

O resíduo correspondente é dado pela relação 5.14.

$$r_1 = K_{mag} \cdot i_c - B_{palh} \cdot \omega - \frac{F_{ra}}{l_3} - J_{palh} \cdot \frac{d\omega}{dt} - \frac{\omega \cdot t}{K_{mMT}} \quad (5.14)$$

Para o deslocamento linear da válvula camisa carretel é extraído o modelo da Figura 4.2, com as equações constitutivas sendo desenvolvidas a seguir.

Figura 5.2 - BG para avaliação do sensor  $Df : v_{VP}$ .



Fonte: [Autor]

No modelo em BG da figura 5.2 para a junção 1 ( $dx_{VP} - dt$ ), tem-se:

$$f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = \frac{dx_{VP}}{dt} = v_{VP} \quad (5.15)$$

$$e_6 = e_2 - e_3 - e_4 - e_5 \quad (5.16)$$

Da junção 0 ( $P_{cL}$ ), tem-se:

$$f_1 = Q_{cL} \quad (5.17)$$

$$e_1 = P_{cL} \quad (5.18)$$

No transformador ( $TF : A_{VP}$ ), tem-se:

$$e_2 = n \cdot e_1$$

$$e_2 = A_{VP} \cdot P_{cL} \quad (5.19)$$

No dissipador ( $R : B_{VP}$ ), tem-se:

$$e_3 = B_{VP} \cdot f_3$$

$$e_3 = B_{VP} \cdot \frac{dx_{VP}}{dt} \quad (5.20)$$

Na indutância ( $I : m_{VP}$ ), tem-se:

$$e_4 = I \cdot \frac{df_4}{dt}$$

$$e_4 = m_{VP} \cdot \frac{dv_{x_{VP}}}{dt} \quad (5.21)$$

Na capacitância ( $C : K_{mVP}$ ), tem-se:

$$f_5 = C \cdot \frac{de_5'}{dt}$$

$$v_{VP} = K_{mVP} \cdot \frac{de_5'}{dt}$$



$$\int v_{VP} \cdot dt = \int K_{mMT} \cdot de_5'$$

$$e_5' = \frac{v_{VP} \cdot t}{K_{mMT}} \quad (5.22)$$

Na capacitância (C:  $C : K_{sh}$ ), tem-se:

$$f_5 = C'' \cdot \frac{de_5''}{dt}$$

$$\int v_{VP} \cdot dt = \int K_{sh} \cdot de_5''$$

$$e_5'' = \frac{v_{VP} \cdot t}{K_{sh}} \quad (5.23)$$

A resultante do esforço  $e_5$  é dada a seguir:

$$e_5 = e_5' + e_5''$$

$$e_5 = \frac{v_{VP} \cdot t}{K_{mMT}} + \frac{v_{VP} \cdot t}{K_{sh}} = v_{VP} \cdot t \left( \frac{1}{K_{mMT}} + \frac{1}{K_{sh}} \right) \quad (5.24)$$

Com a determinação dos os esforços, o segundo ARR vem da equação de junção à qual o detector de fluxo  $Df : v_{VP}$  pertence, sendo desenvolvido na equação 5.16.

$$e_6 = e_2 - e_3 - e_4 - e_5$$

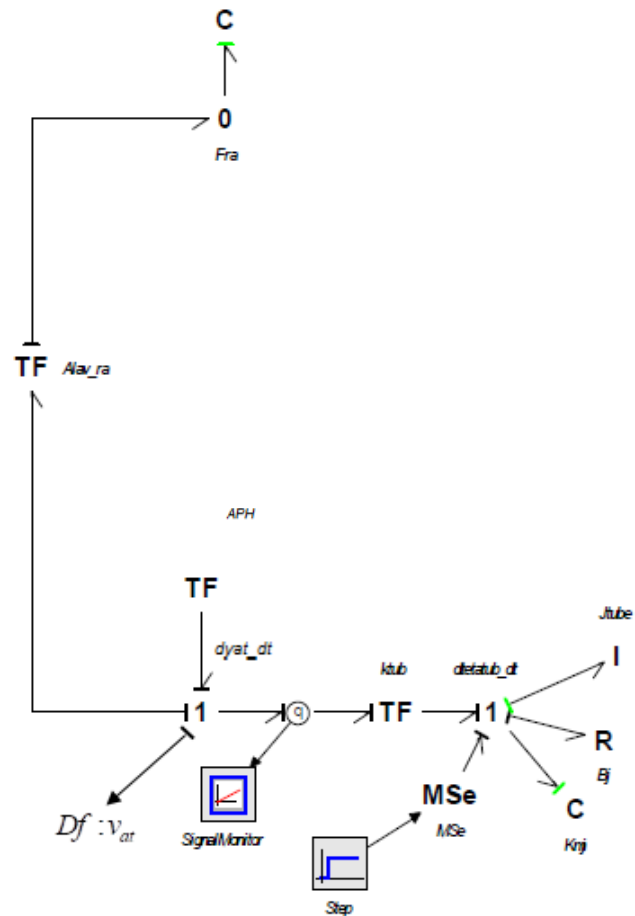
$$ARR_2 : A_{VP} \cdot P_{cL} - B_{VP} \cdot \frac{dx_{VP}}{dt} - m_{VP} \cdot \frac{dv_{VP}}{dt} - v_{VP} \cdot t \left( \frac{1}{K_{mMT}} + \frac{1}{K_{sh}} \right) = 0 \quad (5.25)$$

O resíduo correspondente é dado pela relação 5.26.

$$r_2 = A_{VP} \cdot P_{cL} - B_{VP} \cdot \frac{dx_{VP}}{dt} - m_{VP} \cdot \frac{dv_{VP}}{dt} - v_{VP} \cdot t \left( \frac{1}{K_{mMT}} + \frac{1}{K_{sh}} \right) \quad (5.26)$$

Para o deslocamento linear do pistão hidráulico é extraído o modelo da Figura 4.2, com as equações constitutivas sendo desenvolvidas a seguir.

Figura 5.3 - BG para avaliação do sensor  $Df : v_{at}$ .



Fonte: [Autor]

No modelo em BG da Figura 5.3 para a junção 1 ( $dy_{at} - dt$ ), tem-se:

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \frac{dy_{at}}{dt} = v_{at} \quad (5.27)$$

$$-e_4 = e_1 - e_2 + e_3$$

$$e_4 = e_2 - e_1 - e_3 \quad (5.28)$$

No transformador ( $TF : Alav_{ra}$ ), tem-se:

$$e_1 = e_5 \frac{l_2}{l_1} = F_{ra} \frac{l_2}{l_1} \quad (5.29)$$

No transformador ( $TF : APH$ ), tem-se:

$$\begin{aligned} e_2 &= n \cdot e_6 \\ e_2 &= APH \cdot P_L \end{aligned} \quad (5.30)$$

Da junção 1 ( $dy_{at} - dt$ ), tem-se:

$$e_3 = F_{at}$$

Com a determinação dos os esforços, o terceiro ARR vem da equação da junção à qual o detector de fluxo  $Df : v_{at}$  pertence, sendo desenvolvido na equação 5.28.

$$\begin{aligned} e_4 &= e_2 - e_1 - e_3 \\ ARR_3 : APH \cdot P_L - F_{ra} \frac{l_2}{l_1} - F_{at} &= 0 \end{aligned} \quad (5.31)$$

O resíduo correspondente é dado pela relação 5.32.

$$r_3 = APH \cdot P_L - F_{ra} \frac{l_2}{l_1} - F_{at} \quad (5.32)$$

Com a dedução das relações de redundância analítica e os correspondentes resíduos a matriz de assinatura de falha correspondente ao servomotor é obtida na Tabela 5.1, obedecendo as condições expostas na seção 2.6. Essas condições determinam que um componente é sensível a falha quando um de seus parâmetros é identificado no resíduo definido pelo ARR, dessa forma, quando ocorrer o cruzamento do parâmetro do componente com a relação obtida no resíduo assinala-se na matriz de falha “1” para sensibilidade quanto a falha e “0” caso contrário.

Tabela 5.1 - Matriz de assinatura de falha

	<b>Motor de Torque</b>	<b>Válvula Bocal Palheta</b>	<b>Válvula Camisa Carretel</b>	<b>Mecanismo de Realimentação</b>	<b>Atuador Hidráulico</b>	<b>Sensor <math>\omega</math></b>	<b>Sensor <math>v_1</math></b>	<b>Sensor <math>v_2</math></b>
$r_1$	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$r_2$	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
$r_3$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
$D_b$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
$I_b$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fonte: [Autor]

## 6 Resultados e Discussão

Com a definição do sistema a ser estudo, foram apresentados durante o trabalho informações quanto aos componentes do servomotor e quanto a metodologia para chegar a lógica necessária a definir as falhas que podem vir a ocorrer.

Foram apresentados os modelos individualizados e sua interligação em Grafos de ligação para a, conseqüente, geração das Relações de Redundância Analítica (ARR) que fornecem os dados para a criação da matriz de assinatura de falha.

Essa matriz foi deduzida a partir dos resíduos oriundos das equações constitutivas definidas pelas ARR e obefecendo a lógica apresentada na seção 2.6. As linhas da matriz correspondem aos residuais e as colunas correspondem às possíveis falhas nos componentes físicos do sistema.

A fim de avaliar a assinatura das possíveis falhas quanto à detectabilidade ( $D_b$ ) e isolabilidade ( $I_b$ ) duas linhas foram adicionadas à matriz. Na seção 2.6, ficou indicado que falha é indentificada pelo valor “1” e “0” pela ausência mostrando a influência dos componentes correspondentes nas variações residuais.

Observando as relações 5.14, 5.26 e 5.32 que se referem aos resíduos e a matriz de assinatura de falha, pode-se avaliar cada componente e verificar se são sensíveis a falha.

$$\text{O resíduo } r_1 = K_{mag} \cdot i_c - B_{palh} \cdot \omega - \frac{F_{ra}}{l_3} - J_{palh} \cdot \frac{d\omega}{dt} - \frac{\omega \cdot t}{K_{mMT}}$$

mostra que o Motor de Torque e o Mecanismo de realimentação apresentam valor “1” justamente pelas variáveis que se referem a esses componentes e pela leitura do sensor que mede a velocidade angular  $\omega$  da palheta.

$$\text{O resíduo } r_2 = A_{VP} \cdot P_{cL} - B_{VP} \cdot \frac{dx_{VP}}{dt} - m_{VP} \cdot \frac{dv_{VP}}{dt} - v_{VP} \cdot t \left( \frac{1}{K_{mMT}} + \frac{1}{K_{sh}} \right)$$

mostra que a Válvula Bocal Palheta e a Válvula Camisa Carretel apresentam valor “1” justamente pelas variáveis que se referem a esses componentes e pela leitura do sensor que mede a velocidade linear  $v_1$  do carretel.

$$\text{O resíduo } r_3 = APH \cdot P_L - F_{ra} \frac{l_2}{l_1} - F_{at}$$

mostra que Mecanismo de realimentação e o Atuador Hidráulico apresentam valor “1” justamente pelas variáveis que se referem a esses componentes e pela leitura do sensor que mede a velocidade linear  $v_2$  do atuador.

Quando o valor “1” aparecem nas linhas  $D_b$  e  $I_b$ , respectivamente, significa que a falha referente a determinados componentes é detectável e isolável. Dessa forma, da Tabela 5.1, pode-se concluir que todas as falhas correspondentes aos componentes do servoatuador são detectáveis e, apenas uma, é isolável a que se refere ao mecanismo de realimentação pois

é a que possui assinatura de falha única na matriz,  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ .

## 7 Conclusão

A partir dos estudos feitos expostos no Estado da arte, ficou constatado que os métodos de detecção e isolamento de falhas são de grande importância para mitigar interrupções de sistemas tão complexos quanto aos atuais.

Nesta dissertação, foi estudado um servocontrolador de posição eletrohidráulico modelado em Grafos de ligação em [15]. Como já foi exposto, essa modelagem é uma representação gráfica unificada de sistemas multi-físicos e dessa forma foi possível caracterizar o comportamento do servoatuador por meio de equações constitutivas.

Como essa modelagem é feita diretamente na planta real, ela proporciona mais confiabilidade e robustez ao processo de detecção de falhas pois com o modelo é possível identificar as equações que compõem a dinâmica do servoatuador ao contrário de outra vertente de estudo que atua em modelos não explícitos e a partir da estimativa de parâmetros.

O modelo de referência do sistema foi, portanto, definido na causalidade derivada preferencial para deduzir as relações analíticas de redundância. Essas ARR's foram usadas para construir a Matriz de Assinatura de Falhas para simular um cenário de detecção de falhas.

Na seção 6, com a matriz de falhas foram estabelecidos os resultados quanto à identificação de problemas no servoatuador e constatou-se que as falhas são detectáveis em todos os componentes e apenas no Mecanismo de Realimentação essa falha pode ser isolada pelo registro da sua assinatura.

No caso do problema proposto, o entendimento do sistema e a análise dos parâmetros de falha a partir das equações constitutivas evitará que o atuador interrompa suas atividades num momento crucial de missão. Além disso, essa ação propõe ao operador capacidade de elaborar medidas preventivas que mitiguem a ocorrência de alguma falha, por exemplo, a criação de alguma redundância no sistema, tal como, a colocação de um sistema auxiliar que forneça pressão e vazão hidráulica para que o servoatuador opere.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta seção serão enumeradas algumas sugestões que possam ser estudadas em trabalhos futuros para contribuir com o conhecimento sobre Detecção e Isolamento de Falhas.

- Verificar as falhas nas junções de esforço, avaliando a pressão e vazão hidráulica dentro do servomotor;
- Desenvolver a metodologia no modelo BG do servomotor com as não linearidades expostas na seção 4.1.5;
- Com o desenvolvimento da lógica para a metodologia FDI, criar um tomador de decisão computacional que avalie as condições em tempo real do servomotor e assim indique as falhas que vierem a ocorrer;
- Desenvolver a metodologia em outros equipamentos críticos do controle vetorial de empuxo, tal como a própria tubeira/junta flexível;
- Propor o estudo a outros equipamentos do CLA, por exemplo: sistemas de atuação de rampas de lançamento.



## REFERÊNCIAS

- [1] BLANKE, M.; LORENTZEN, T. A software tool for structural analysis of complex automation system. IFAC safeprocess conference, p. 673-678, 2006.
- [2] BLANKE, M.; LUNZE J.; STAROSWIECKI, M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control - Design Schemes, Algorithms, and Tools, 2nd Edition, Springer-Verlag, Heidelberg, 2006.
- [3] BOUAMAMA, B. O. et al. Graphical methods for diagnosis of dynamic systems: Review. Annual Reviews in Control, n. 38, 2014. 199-220.
- [4] BOUAMAMA, O. et al. Supervision of an Industrial steam generator. Part I: Bond Graph modelling. Control Engineering Practice, 2006.
- [5] CAUFFRIEZ, L. et al. Bond Graph modeling for fault detection and isolation of a train door mechatronic system. Control Engineering Practice, Valenciennes, abril 2017.
- [6] DING, S.X. Model-based fault diagnosis techniques – design schemes, algorithms, and tools, Springer-Verlag, 2008.
- [7] GARCIA, A. Automatização aplicada a Lançadpres de Foguete de sondagem para compensação da Influência dos Ventos. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2007. 145 p.
- [8] GAWTHROP, P.J. Bond Graphs: A representation for mechatronic systems. Mechatronics, 1(2):127-156, 1991.
- [9] GÓES, L. C. S. Notas de aula da disciplina MP 271. São José dos Campos: ITA, 2017.
- [10] HENRY, D. Robust Control and Linear Parameter Varying Approaches, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 437:125-180, 2013.
- [11] ISERMANN, R. Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Darmstadt: Springer, 2006. 466 p, 2006.
- [12] JHA, M. S.; TANGUY, G. D.; BOUAMAMA, O. B. Robust fault detection with Interval Valued Uncertainties in Bond Graph Framework. Control Engineering Practice, 2017. 61-78.
- [13] KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R. C. Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems. 5°. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. 645 p.

- [14] KELIRIS, C., POLYCARPOU, M., PARISINI, T. A robust nonlinear observer-based approach for distributed fault detection of input–output interconnected systems, *Automatica*, 53 :408-415, 2015.
- [15] LOUREIRO, L. P. Modelo dinâmico bond graph para servo posicionador eletrohidráulico utilizado no posicionamento da tubeira de um veículo lançador de satélite. São José dos Campos: [s.n.], 2010. 149 p.
- [16] MEDJAHER, K. A Bond Graph Model-Based Fault Detection and Isolation. *Maintenance Modelling and Applications*, 2011. 503-512.
- [17] MERZOUKI, R. et al. Backlash fault detection in mechatronic system, *Mechatronics*, 17(6): 299-310, 2007.
- [18] MEZGHANNI, D. et al. Bond Graph modelling of a photovoltaic system feeding an induction motor-pump. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(10): 1224-1238, 2007.
- [19] MOREIRA, F. J. O. Modelo do servo mecanismo da tubeira móvel do VLA. São José dos Campos: IAE/ASE, 1990.
- [20] NAZARI, R.; SERON, M.M.; DE DONÁ, J.A. Fault-tolerant control of systems with convex polytopic linear parameter varying model uncertainty using virtual-sensor-based controller reconfiguration, *Annual Reviews in Control*, 37(1):146-153, 2013.
- [21] PALMERIO, A. F. Introdução à Tecnologia de Foguetes. São José dos Campos: SindCT, 2017.
- [22] PAYNTER, H.M. Hydraulics by analog and electronic model of a pumping plant, *J. Boston Soc. Civil Eng.*, 46(6):197–219, 1959.
- [23] PONSART, J.C.; THEILLIOL, D.; AUBRUN, C. Virtual sensors design for active fault tolerant control system applied to a winding machine, *Control Engineering Practice*, 18(9):1037–1044, 2010.
- [24] PUCCI, L. F. Educação UOL, 2008. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/reacao-de-empuxo-como-os-foguetes-se-locomovem.htm>>. Acesso em: 13 Agosto 2018.
- [25] ROBERTS, D.W., BALANCE, D.J. & GAWTHROP, P.J. Design and implementation of a Bond Graph observer for robot control. *Control Engineering Practice*, 3(10): 1447-1457, 1995.

- [26] RODRIGUES, M. V. Blog da Qualidade, 2012. Disponível em: <<https://blogdaqualidade.com.br/analise-de-modos-de-falhas-e-efeitos-fmea/>>. Acesso em: 28 julho 2019.
- [27] SAID, M. et al. The Fault detection approach using Bond Graph model. *Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering*, 2017. 302-307.
- [28] SAMANTARAY, A.K., GHOSHAL, S.K. Bicausal Bond Graphs for supervision: From fault detection and isolation to fault accommodation, *Journal of The Franklin Institute*, 345(1): 1-28, 2008.
- [29] SPACEX. SPACEX, 2015. Disponível em: <<https://www.spacex.com/gallery/2015-0>>. Acesso em: 13 Agosto 2018.
- [30] STAROSWIECKI, M.; COMTET-VERGA, G. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, p. 687-699, 2001.
- [31] STAROSWIECKI, M.; COQUEMPOT, V.; CASSAR, J. P. Generation of analytical redundancy relations in linear interconnected system. In *IMACS annals on computing and applied mathematics proceedings MIN-S2 90*. Brussels, 1990.
- [32] VARGA, A.; OSSMANN, D. LPV model-based robust diagnosis of flight actuator faults, *Control Engineering Practice*, 31:135-147, 2014.
- [33] VENKATASUBRAMANIAM, V. Process fault detection and diagnosis: Past, present and future. *Proceedings of 4th IFAC workshop on line fault detection and supervision in the chemical process industries*, South Korea, p. 3-15, 2001.
- [34] WUTTKE, R. A.; SELLITTO, M. A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Produção Online*, v. VIII, n. 4, Dezembro 2008.
- [35] YOON, S.; MACGREGOR, J. F. Fault diagnosis with multivariate statistical models. Part i: Using steady state fault signature. *Journal of Process Control*, 11, 387–400, 2001.