

Diagnóstico de falhas baseado em modelo para um sistema de controle de voo eletro-hidráulico

Tiago de Barros Caldas¹, Emilia Villani¹ e Henrique Costa Marques¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo - Este artigo discute o projeto de sistemas de diagnóstico de falhas para aplicações aeroespaciais utilizando uma abordagem baseada em modelos e a ferramenta *FaultDiagnosisToolbox* desenvolvida pela Universidade de Linköping para o ambiente de modelagem MATLAB. Por meio da sua aplicação a um estudo de caso, o sistema de acionamento eletro-hidráulico de superfície de controle de voo, avalia-se as vantagens e limitações desta abordagem para o setor aeroespacial. Entre as conclusões deste trabalho destaca-se a necessidade de explorar a existência de redundância na arquitetura do sistema a ser monitorado de tal forma a reduzir a complexidade do projeto do sistema de diagnóstico de falhas.

Palavras-Chave - Diagnóstico de falhas, detecção e isolamento de falhas, FDI baseado em modelo.

I. INTRODUÇÃO

O emprego de sistemas de diagnóstico de falhas é uma das principais estratégias utilizadas para garantir a segurança e a disponibilidade de sistemas críticos aeroespaciais. Tal solução, também identificada pelo acrônimo FDI (do termo em inglês *Fault Detection and Isolation*) [1], permite não apenas detectar a ocorrência de uma falha, como também isolar qual falha ocorreu, dentro de um conjunto de falhas possíveis que afetam o comportamento do sistema aeroespacial. Desta forma, é possível disparar a adoção tempestiva de medidas de contingência que reduzam o impacto da falha na operação de um sistema de controle.

Em geral, as abordagens propostas na literatura para o projeto de sistemas de diagnóstico de falhas podem ser organizadas em duas classes: baseadas em modelo (*model-based FDI*) e baseadas em dados (*data-driven FDI*) [2].

No primeiro caso, o projeto do sistema de diagnóstico requer a especificação de um modelo dinâmico do sistema a ser monitorado, incluindo o efeito das falhas em seu comportamento. Por outro lado, as abordagens *data-driven*, frequentemente baseadas em algoritmos de inteligência artificial, requerem a existência de extenso banco de dados com histórico de operação do sistema, incluindo situações de falha. A indisponibilidade de uma base de dados adequada constitui muitas vezes um limitador importante, contraindicando o uso de abordagens *data-driven*.

Neste contexto, o presente trabalho avalia a aplicabilidade de uma abordagem baseada em modelos para a especificação de um sistema de diagnóstico de falhas para aplicação aeroespacial, analisando suas vantagens e desvantagens frente às características típicas de um sistema de controle de superfície de voo.

A abordagem em análise foi proposta pela Universidade de Linköping e é suportada por um conjunto de funções disponíveis para o ambiente de modelagem e programação

MATLAB. Estas funções se encontram agrupadas na ferramenta FDT (do acrônimo em inglês para *Fault Diagnosis Toolbox*) [3].

Neste trabalho, utiliza-se como estudo de caso um dos sistemas de acionamento de superfície de controle da aeronave F-16. Este sistema, do tipo eletro-hidráulico, é ilustrado na Fig. 1 e foi inspirado no exemplo disponibilizado na ferramenta de modelagem e simulação HOPSAN [4]. Ele é composto por dois atuadores hidráulicos conectados em *tandem*, acionados por duas servo-válvulas distintas e alimentados por dois sistemas hidráulicos independentes. Uma malha de controle proporcional comanda ambas as servo-válvulas com o objetivo de minimizar o erro de posicionamento da superfície de controle.

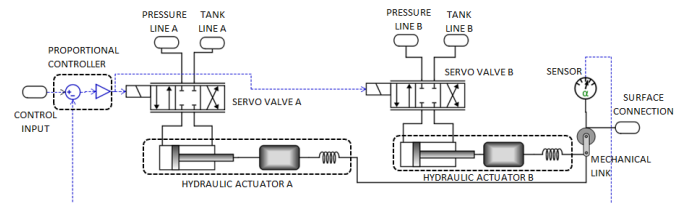


Fig. 1. Sistema de atuadores de superfície de controle modelado.

Ainda em relação ao estudo de caso da Fig. 1, observa-se que, diferentemente da versão original disponibilizada pela ferramenta HOPSAN como exemplo, o conjunto massa-mola conectado a cada atuador hidráulico foi introduzido neste trabalho para permitir a modelagem de algumas falhas, conforme detalhado nas próximas seções.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta, de forma resumida, a abordagem *model-based* analisada neste trabalho. Em seguida, a Seção 3 ilustra e discute sua aplicação ao estudo de caso da Fig. 1 e analisa os resultados obtidos. Finalmente, a Seção 4 resume as principais conclusões obtidas e propõe trabalhos futuros.

II. PROJETO DO SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

A arquitetura considerada neste trabalho para o sistema de diagnóstico de falhas é ilustrada na Fig. 2, adaptada de [5]. Durante sua operação, o sistema a ser monitorado recebe como entrada comandos do usuário (u) e disponibiliza os valores de um conjunto de variáveis de saída (y), eventualmente afetadas pela ocorrência de falhas (f).

O primeiro passo para o projeto de um sistema de diagnóstico baseado em modelo é a especificação de um modelo do comportamento dinâmico do sistema, geralmente na forma de sistema de equações diferenciais. Para permitir o diagnóstico de falhas, esse modelo deve ser sobredeterminado, isto é, ter mais equações do que variáveis. Tal característica permite que o valor de uma variável seja determinado de duas ou mais formas distintas [1], explorando relações de redundância analítica (*Analytical Redundancy Relations* – ARR).

T. B. Caldas, tiago.caldas@eb.mil.br, Tel +55(12)2123-7699; E. Villani, evillani@ita.br, Tel +55(12)3947-6948; H. C. Marques, hmarques@ita.br, Tel +55(12)3947-5763.

A existência de ARR possibilita o diagnóstico de falhas por meio de uma avaliação de consistência entre o valor das saídas estimado pelo modelo (\hat{y}) e o valor das saídas (y) efetivamente medido no sistema [6]. Esta comparação é realizada por funções resíduo. Cada resíduo é uma equação cujo resultado deve ser zero durante a operação normal do sistema e deve assumir valores diferentes de zero durante a ocorrência de falha, permitindo assim sua detecção.

Além disso, um sistema de diagnóstico busca, idealmente, que cada falha sensibilize um conjunto único de resíduos possibilitando assim a capacidade de isolamento da falha por um processo de exclusão de hipóteses [6].

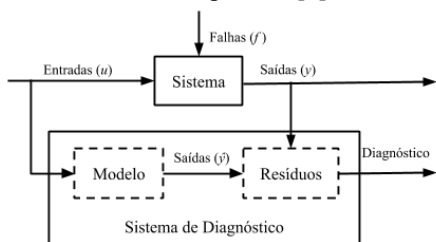


Fig. 2. Arquitetura básica de um sistema de diagnóstico *model-based*.

Considerando o acima exposto, o toolbox FDT analisado neste trabalho suporta a especificação das funções resíduo segundo um processo composto por 6 etapas, conforme ilustrado na Fig. 3, adaptada de [3].

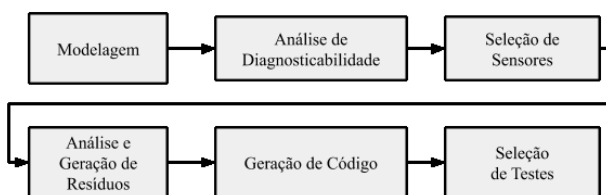


Fig. 3. Fases do projeto de um sistema de diagnóstico.

De forma resumida, a etapa de modelagem consiste na definição de um modelo simbólico composto pela declaração de variáveis internas, variáveis conhecidas (de entrada e de saída), variáveis associadas a falhas e equações algébricas e dinâmicas. Na etapa seguinte, as equações que compõem o modelo são organizadas numa estrutura matricial onde as linhas representam as equações e as colunas representam as variáveis do modelo.

Utilizando o método de Decomposição de Dulmage-Mendelsohn – DMD (do acrônimo em inglês para *Dulmage-Mendelsohn Decomposition*), essa matriz é rearranjada de tal forma a separar o modelo em subconjuntos de equações subdeterminadas (M-), exatamente determinadas (M) e sobredeterminadas (M+) [7]. A partir da observação da DMD e com base na distribuição das variáveis associadas a falhas entre M-, M e M+ é possível definir, conceitualmente, quais falhas podem ser detectadas e isoladas das demais.

Em função do resultado obtido na análise de diagnosticabilidade, a etapa seguinte explora diferentes conjuntos de sensores, analisando a capacidade correspondente do sistema de detectar e isolar falhas.

Uma vez definido o conjunto de sensores a ser utilizado no sistema de diagnóstico, segue-se para geração de resíduos, que é realizada por meio da manipulação simbólica das equações do modelo. Por fim, compara-se o desempenho de diferentes resíduos com objetivo de selecionar aqueles que serão de fato codificados e implementados no sistema de diagnóstico.

III. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE APLICABILIDADE

Esta seção analisa a aplicação do método introduzido na seção anterior para o sistema de acionamento de superfície de controle. O objetivo deste estudo de caso é identificar vantagens, limitações e potenciais melhorias para melhor adequar o método às necessidades de aplicações aeroespaciais.

A. Modelagem

A etapa de modelagem é determinante no projeto do sistema de diagnóstico, cujo desempenho é afetado pela escolha do nível de detalhamento utilizado e pela definição do conjunto de falhas a serem incorporadas no modelo.

No caso do sistema ilustrado na Fig. 1, a modelagem dos componentes físicos do sistema foi baseada nos seguintes princípios: para o atuador hidráulico considerou-se o balanço de massa em cada uma das câmaras hidráulicas e o efeito da compressibilidade do fluido na variação da pressão. Considerou-se também a existência de vazamento entre câmaras.

Do ponto de vista mecânico, incluiu-se o balanço de forças no atuador. A servo-válvula foi modelada por meio da equação de “vena contracta” utilizada na literatura para modelar a passagem de fluido por restrição. Observa-se que, uma vez que o modelo simbólico aceita apenas equações algébricas e diferenciais, o chaveamento entre as posições da servo-válvula foi modelado por meio da definição de funções externas ao modelo simbólico.

Para ilustrar uma etapa de modelagem, a Fig. 4 apresenta um trecho da definição do modelo correspondente ao atuador hidráulico e servo-válvula A, enquanto as variáveis utilizadas no modelo são descritas na Tabela I.

Adotou-se como convenção que quando o nome da variável inicia com a letra ‘d’ a variável corresponde a uma derivada (‘dpA1’ equivale a derivada da variável pA1, isto é, dpA1/dt) e quando se inicia com a letra ‘f’ a variável corresponde a uma falha (fLeakA equivale a ocorrência de vazamento interno excessivo no atuador hidráulico associado à servo-válvula A).

Os modos de falha associados ao funcionamento do sistema eletro-hidráulico foram estudados sob diferentes aspectos e apresentados por vários autores [8]-[12].

```

% Declaration of symbolic equations
modelDef.rels = {
    ... % Equations of actuator + servo-valve A
    DpA1pA2*A == m*apA + BpA*vpA - FA, ... % Eq 1
    DpA1pA2 == pA1 - pA2, ... % Eq 2
    qA1 - qLeakA == dVA1 + (VA1/betaA)*dpA1, ... % Eq 3
    qA2 + qLeakA == dVA2 + (VA2/betaA)*dpA2, ... % Eq 4
    qLeakA == cLeakA*(pA1 - pA2), ... % Eq 5
    dVA1 == A*(vpA), ... % Eq 6
    dVA2 == A*(-vpA), ... % Eq 7
    FA == KA*(xA - xpA), ... % Eq 8
    vpA == dxpA, ... % Eq 9
    apA == dvpA, ... % Eq 10
    cLeakA == NcLeak*(1+fLeakA), ... % Eq 11
    BpA == NBp*(1+fBpA), ... % Eq 12
    betaA == Nbeta*(1+fbetaA), ... % Eq 13
    KA == NK*(1+fKA), ... % Eq 14
    qAP == fqP(pAP, pA1, pA2, yA, ymax, rho, Cq, Ka), ... % Eq 15
    qAT == fqT(pAT, pA1, pA2, yA, ymax, rho, Cq, Ka), ... % Eq 16
    qA1 == fq1(pA1, pAP, pAT, yA, ymax, rho, Cq, Ka), ... % Eq 17
    qA2 == fq2(pA2, pAP, pAT, yA, ymax, rho, Cq, Ka), ... % Eq 18
    yA == yref*(1 - fyA) + ybck*fyA, ... % Eq 19
    ...
    
```

Fig. 4. Equações do conjunto atuador e servo-válvula A.

TABELA I. Variáveis e parâmetros do conjunto atuador e servo-válvula A.

Atuador Hidráulico A	
Variável e/ou parâmetro	Descrição
qA1, qA2	Vazão de entrada nas câmaras 1 e 2 do atuador A
pA1, pA2	Pressão nas câmaras 1 e 2 do atuador A
DpA1pA2	Diferença entre as pressões das câmaras 1 e 2
VA1, VA2	Volume das câmaras 1 e 2 do atuador A
qleakA	Vazamento entre as câmaras 1 e 2 do atuador A
apA, vpA, xpA	Aceleração, velocidade e deslocamento do pistão A
vA, xa	Velocidade e deslocamento após a mola
FA	Força na conexão com o link mecânico
yA, yref	Posição real e comandada da válvula A
qAT, pAT	Vazão e pressão na linha de retorno
qAP, pAP	Vazão e pressão na linha pressurizada
BpA	Atrito viscoso
betaA	Compressibilidade do fluido
cleakA	Coefficiente de vazamento entre as câmaras
KA	Constante da mola
m, A	Massa e área do pistão
rho	Densidade do óleo
Cq	Coefficiente de válvula

Com base na revisão da literatura, selecionou-se o seguinte conjunto de falhas, já incorporadas ao modelo:

- Vazamento excessivo interno ao atuador hidráulico, modelada por meio da modificação do coeficiente de vazamento (cleakA);
- Travamento do atuador hidráulico, modelada por meio da modificação abrupta do coeficiente de amortecimento viscoso (BpA);
- Presença de ar no fluido hidráulico, modelada por meio da modificação do coeficiente de compressibilidade (betaA);
- Ruptura ou dano da conexão mecânica com a superfície de controle, modelada por meio da modificação do coeficiente de rigidez da mola (KA);
- Travamento da servo-válvula, modelada por meio da modificação da posição da servo-válvula (yA), que no caso de falha deixa de ser definida pelo controlador do sistema; e
- Falha no sensor de posição angular da superfície de controle, modelada por meio da modificação do sinal realimentado para o controlador (thS).

A ocorrência de uma falha corresponde à modificação do valor de uma variável de falha (ex.: fcleakA). Tomando como exemplo a falha de vazamento, na ausência de falha tem-se que fcleakA = 0, o que resulta em cleakA = NcleakA (o valor atribuído ao coeficiente de vazamento na ausência de falha). Quando ocorre uma falha, fcleakA é modificado, alterando o valor de cleakA.

A etapa de modelagem do estudo de caso ressaltou as seguintes características da abordagem em análise: o FDT não disponibiliza recursos para criação do modelo de um sistema por meio da composição dos modelos de seus componentes.

Na mesma linha, o toolbox FDT também não permite a criação de múltiplas instâncias do modelo de um mesmo componente. Recursos para modelagem incremental e/ou hierárquica facilitariam a aplicação da abordagem para

sistemas aeroespaciais, em geral caracterizados por alto grau de redundância, possibilitando o reuso de modelos.

Como pontos positivos identificados ressalta-se a possibilidade de uso de funções externas para modelagem de não linearidades, tais como o chaveamento da posição da servo-válvula, limites de fim de curso e zonas mortas.

B. Análise de Diagnosticabilidade

O modelo completo do sistema de acionamento eletro-hidráulico, incluindo os subsistemas A e B, o link mecânico e o controlador, é composto por 61 equações e 67 variáveis. Tal modelo é subdeterminado e, para prosseguir para a etapa de análise de diagnosticabilidade, é necessário definir um número mínimo de “variáveis conhecidas” de tal forma a tornar o modelo pelo menos exatamente determinado.

Variáveis conhecidas são aquelas fornecidas ao sistema de diagnóstico de falhas e podem ser entradas, tal como o valor de referência para posição da superfície de controle, ou variáveis oriundas dos sensores, tal como a deflexão real da superfície.

Para prosseguir na análise foram então selecionadas 6 variáveis declaradas como conhecidas. São elas o comando do piloto (u), a deflexão da superfície (sthS) e as pressões das linhas pressurizadas e dos tanques (pAP, pAT, pBP e pBT).

Como resultado obtém-se um modelo exatamente determinado, isto é, sem redundância analítica. Um modelo exatamente determinado, contudo, não permite a detecção de falhas. Para introduzir redundância analítica é então definido um conjunto de potenciais sensores. São eles:

- DpA1pA2 e DpB1B2: diferencial de pressão entre as câmaras 1 e 2 de cada atuador hidráulico;
- xpA e xpB: deslocamento do atuador hidráulico;
- yA e yB: posição das servo-válvulas;
- TS: momento aplicado na superfície de controle;
- qAP, qAT, qBP e qBT: vazão nas linhas de pressão e retorno de cada sistema hidráulico.

A adição de cada sensor corresponde a uma nova variável conhecida, tornando partes do sistema que anteriormente eram exatamente determinadas em sobredeterminadas. É possível então investigar, utilizando a matriz DMD, quais falhas podem ser detectadas dada a inserção de cada um dos sensores. Para a construção da matriz DMD, o toolbox FDT implementa o método de decomposição canônica. Como exemplo, a Fig. 5 ilustra a matriz DMD obtida após a adição de um sensor para xpA.

O eixo x contém as variáveis do modelo e o eixo y as suas equações. Os pontos azuis indicam que a equação em y contém a variável em x. Um retângulo azul delimita as áreas exatamente determinadas do modelo, enquanto os retângulos preenchidos em cinza representam áreas sobredeterminadas, que podem ser exploradas para detecção de falhas.

As falhas são representadas por linhas vermelhas horizontais tracejadas. Quando uma falha cruza um retângulo cinza, significa que ela é detectável e, quando é a única falha naquela área de equivalência, conclui-se que a falha é isolável [13].

No caso da Fig. 5, as falhas relativas ao atuador e servo-válvula A são detectáveis, mas não podem ser isoladas entre si. Finalizando, a Tabela II sintetiza os resultados obtidos pela adição única de cada um dos sensores listados.

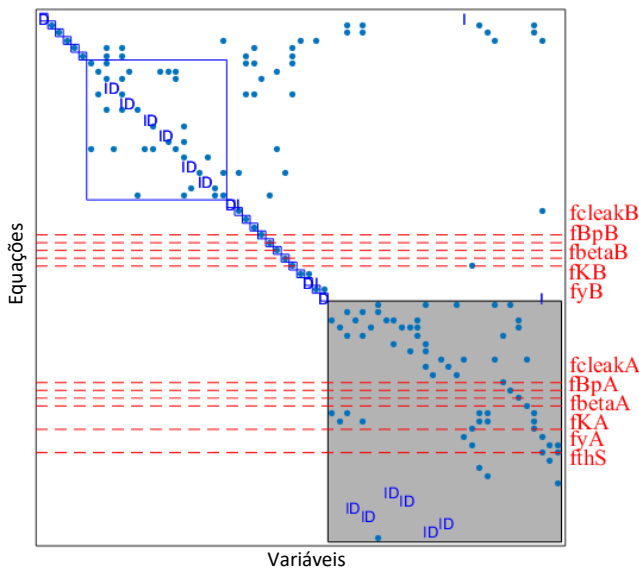


Fig. 5. DMD do sistema com adição do sensor xpA.

Sobre a aplicação da etapa de análise de diagnosticabilidade ao estudo de caso, observa-se que uma atividade crucial é a seleção das chamadas variáveis conhecidas. No caso do sistema de acionamento eletro-hidráulico, a escolha das variáveis levou em consideração não apenas as variáveis efetivamente medidas no sistema de controle, mas também aquelas que poderiam ser estimadas a partir de dados de voo, como o momento aerodinâmico aplicado na superfície.

A decisão tomada neste ponto sobre o conjunto de variáveis conhecidas irá influenciar toda a análise de diagnosticabilidade do sistema, assim como a decisão sobre o conjunto de potenciais sensores a serem adicionados como parte do sistema de diagnóstico.

Finalmente, observa-se, como ponto positivo, que a matriz DMD é uma poderosa ferramenta de comunicação visual permitindo avaliar de forma rápida a capacidade de detecção e isolamento de uma determinada configuração do sistema.

TABELA II. ADIÇÃO DE UM ÚNICO SENSOR.

Nr Ordem	Sensor adicionado	Falhas detectáveis
1	xpA	6: fcleakA, fBpA, fbetaA, fKA, fyA, fthS
2	qAT	6: fcleakA, fBpA, fbetaA, fKA, fyA, fthS
3	qAP	6: fcleakA, fBpA, fbetaA, fKA, fyA, fthS
4	xpB	6: fcleakB, fBpB, fbetaB, fKB, fyB, fthS
5	qBT	6: fcleakB, fBpB, fbetaB, fKB, fyB, fthS
6	qBP	6: fcleakB, fBpB, fbetaB, fKB, fyB, fthS
7	yA	1: fyA
8	yB	1: fyB
9	DpA1A2	6: fcleakA, fBpA, fbetaA, fKA, fyA, fthS
10	DpB1B2	6: fcleakB, fBpB, fbetaB, fKB, fyB, fthS
11	TS	11: fcleakA, fBpA, fbetaA, fKA, fyA, fcleakB, fBpB, fbetaB, fKB, fyB, fthS

C. Seleção de Sensores

Idealmente, todas as variáveis do modelo poderiam ser obtidas por meio do uso de sensores, mas as aplicações industriais normalmente estão sujeitas a restrições de orçamento e viabilidade. O objetivo da fase de seleção de sensores, portanto, é investigar qual o conjunto mínimo de

sensores com potencial para oferecer capacidade de diagnóstico de todas as falhas consideradas.

Para tanto, explora-se o uso de rotinas do toolbox FDT que realizam uma varredura de todas as combinações de sensores a partir de uma lista mínima e fornecem os subconjuntos capazes de garantir a detectabilidade completa das falhas. Para o estudo de caso do sistema de acionamento eletro-hidráulico, foram obtidos 17 conjuntos possíveis, correspondendo ao uso do sensor TS com diferentes combinações de um sensor do subsistema A e um sensor do subsistema B (e.g. TS, vA, vB).

A análise de isolabilidade é realizada na sequência e tem por objetivo definir os conjuntos mínimos de sensores que proporcionam capacidade de identificação unívoca das falhas. Como resultado, são identificados quatro conjuntos de sensores capazes de proporcionar isolabilidade completa: (qAT, qBT, TS), (qAP, qBT, TS), (qAT, qBP, TS) e (qAP, qBP, TS).

Observa-se que todas as soluções encontradas capazes de promover isolabilidade completa de falhas incluem a medição de vazão, o que não é comum em aeronaves. Como alternativa, decidiu-se investigar um sistema que utilize apenas sensores e informações geralmente disponíveis. Para tanto, definiu-se o seguinte conjunto de sensores: xpA, xpB, DpA1pA2, DpB1pB2, yA, yB e TS.

Este conjunto foi definido com base em discussões com especialistas da indústria aeroespacial e foi considerado mais viável do ponto de vista de sua implementação. A seleção garante detectabilidade de todas as falhas consideradas, mas não proporciona isolabilidade completa. A Fig. 6 apresenta a matriz de isolabilidade para o conjunto de sensores considerados, onde cada elemento (i,j) da matriz marcado com um ponto azul indica que a falha em i não pode ser isolada da falha em j .

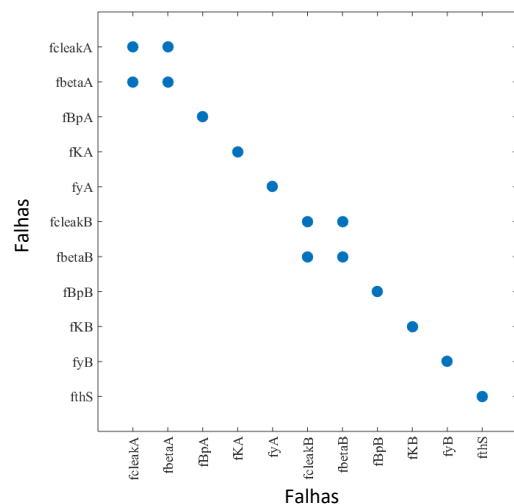


Fig. 6. Matriz de isolabilidade teórica do modelo com os sensores xpA, xpB, DpA1pA2, DpB1pB2, yA, yB e TS.

Sobre a aplicação da etapa de seleção de sensores ao estudo de caso, observa-se que esta tarefa é realizada com base no modelo simbólico sem considerar a redundância existente no sistema.

Conforme esperado, a simetria existente entre os sistemas de acionamento redundantes A e B resulta em simetria em relação aos conjuntos de sensores que proporcionam detectabilidade e isolabilidade, como ilustrado na DMD apresentada na Fig 7.

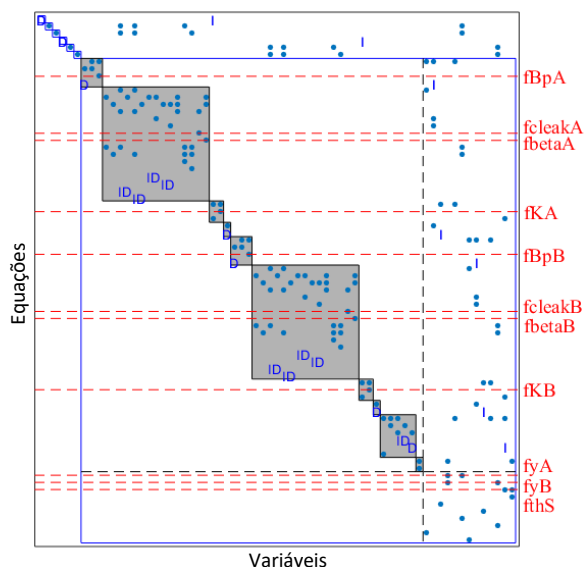


Fig. 7. DMD com os sensores xpA, xpB, DpA1pA2, DpB1pB2, yA, yB e TS.

Quando o modelo do sistema é relativamente simples, como no estudo de caso analisado, a relação de conjuntos pode ser examinada manualmente. No entanto, a medida que a complexidade do sistema aumenta, a identificação de configurações simétricas permitiria reduzir o número de opções a serem analisadas.

Como exemplo, se (qAP, qBT, TS) é um conjunto de sensores que proporcionada isolabilidade e existe simetria entre os sistemas A e B, conclui-se que (qBP, qAT, TS) também é uma configuração que resulta em isolabilidade e terá um desempenho semelhante.

D. Análise de Geração de Resíduos e Geração de Código

Uma vez definido o conjunto de sensores que será utilizado, o modelo se torna sobredeterminado. Para a geração de resíduos, devem ser encontrados os possíveis subconjuntos com grau de redundância igual a um, denominados MSO (*Minimally Structurally Overdetermined*).

A tarefa de encontrar qual equação utilizar de cada MSO pode conduzir rapidamente a análise para um problema de alto custo computacional [6]. É desejável, portanto, que seja encontrado um subconjunto mínimo de MSO que seja sensível ao conjunto completo das falhas especificadas. Tais conjuntos são denominados MTES (*Minimal Test Equation Support*).

No estudo de caso em tela, o método proposto pelo FDT permitiu reduzir os 965 MSO encontrados a um subconjunto de 14 MTES. Em cada MTES, uma das equações do conjunto foi selecionada para a geração dos resíduos (r1 a r14).

A Fig. 8 apresenta uma matriz de assinatura de falhas que indica os resíduos que são sensibilizados por cada falha modelada. Observa-se que esta matriz reflete o resultado da matriz de isolabilidade apresentada na Fig. 6. As linhas correspondentes a fCLeakA e fbetaA são idênticas, confirmando a impossibilidade de seu isolamento.

Como comentário geral sobre a aplicação da etapa de geração de resíduos ao estudo de caso, reforça-se aqui a observação realizada para a etapa anterior. A simetria existente no caso de redundância poderia ser explorada também na geração dos MSO, MTES e potenciais resíduos.

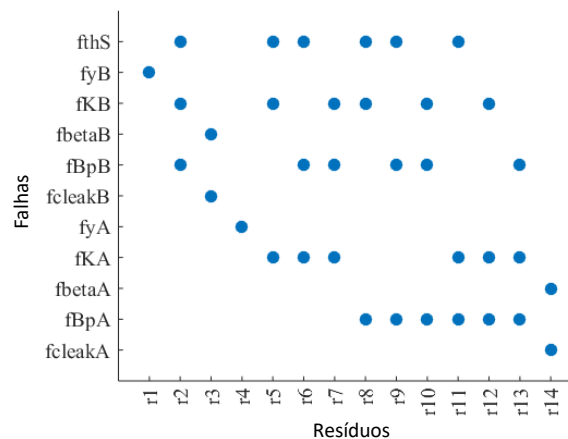


Fig. 8. Matriz de assinatura de falhas para os MTES encontrados.

E. Seleção de testes e análise dos resultados

O resultado apresentado na Fig. 8 apresenta a capacidade teórica de diagnóstico. A solução definitiva deve considerar ainda a causalidade computacional das equações que serão selecionadas. Por causalidade entende-se o tipo de computação que deverá ser efetuada durante o processamento do resíduo [14]. Resíduos de causalidade derivativa possuem eficiência muito limitada na presença de ruídos enquanto os de causalidade integrativa são sensíveis às condições iniciais declaradas. Os resíduos de causalidade mista, intuitivamente, possuem ambos os problemas em alguma proporção [13].

Assim, a seguinte ordem de precedência foi observada na escolha da causalidade das equações selecionadas como resíduos: algébricas, integrativas, mistas e derivativas. Uma vez selecionados, os códigos dos resíduos foram gerados utilizando a abordagem sequencial proposta pelo FDT.

Os resíduos gerados foram posteriormente testados utilizando dados de simulação. Por uma questão de custo computacional, limitou-se esta análise inicial a 0,3s. No instante 0,01s é aplicado um momento aerodinâmico na superfície de controle. As falhas são aplicadas no instante 0,04s e apenas uma falha é aplicada em cada rodada de simulação. No instante 0,2s, modifica-se o comando de referência para deflexão da superfície de controle. Foi testado apenas um nível de intensidade para cada falha.

A Fig. 9 apresenta os resultados dos 14 resíduos gerados a partir da análise estrutural do modelo e da causalidade computacional de cada equação candidata. Os cenários sem falha ou com uma falha à qual o resíduo não é sensível são representados por uma linha em preto que deveria permanecer em zero. Observa-se que a sensibilização dos resíduos nem sempre acontece no instante de aplicação da falha. Em vários casos, tais como 1, 4, 5 e 8, os resíduos são sensibilizados apenas no instante de movimentação da superfície, isto é, a partir de 0,2s.

Observa-se ainda que alguns resíduos não apresentaram o comportamento esperado. Destaca-se, por exemplo, o caso do resíduo 7, que é sensibilizado no instante de movimentação da superfície mesmo em casos onde não foi aplicada nenhuma das falhas às quais o resíduo é sensível. Investigando o problema, concluiu-se que o mesmo é causado por uma inversão de função trigonométrica, que resulta em múltiplos valores possíveis para o resíduo. Tal problema pode ser resolvido pela edição manual da função resíduo.

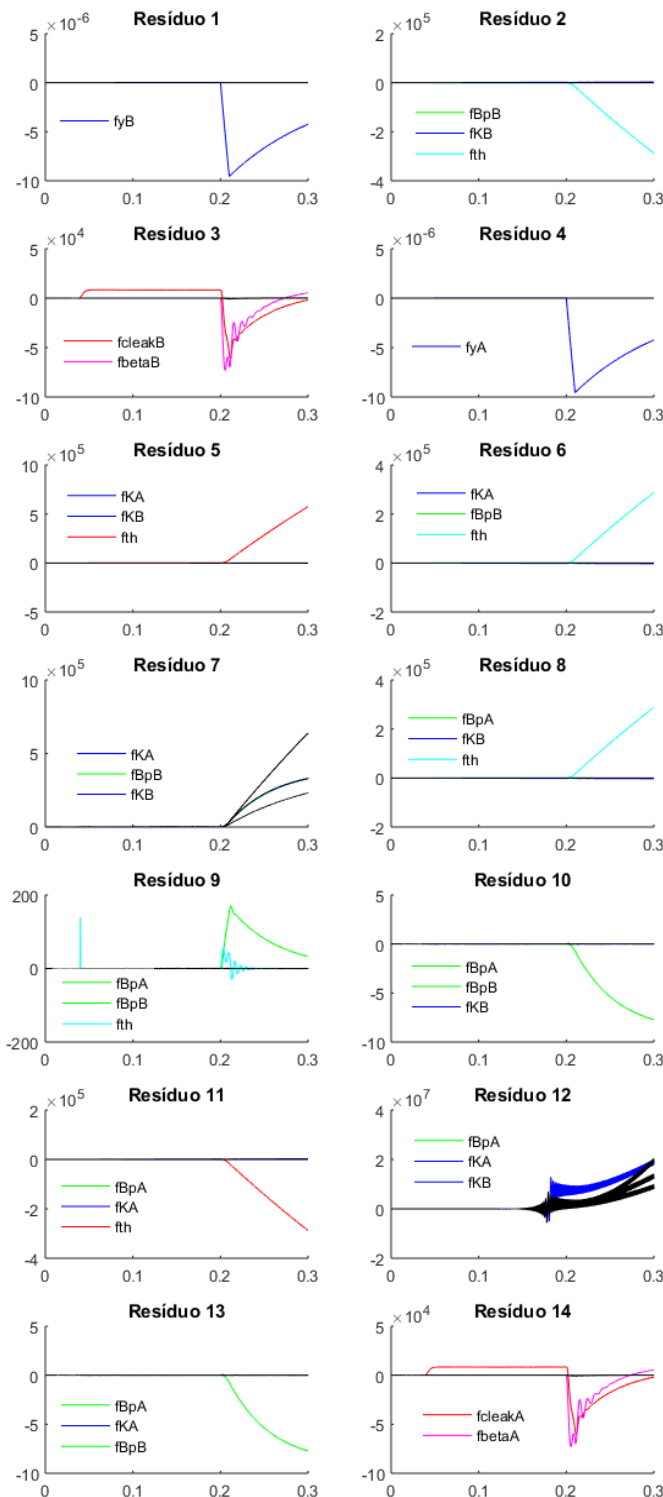


Fig. 9. Comportamento dos resíduos durante a ocorrência de falhas

Por fim, ressalta-se novamente o potencial para simplificação da análise, considerando a redundância na arquitetura do sistema. Como é possível observar, os resíduos 3 e 14 correspondem a comportamentos semelhantes nos sistemas A e B.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho investiga o uso de uma abordagem baseada em modelo e do toolbox FDT, desenvolvido pela Universidade de Linköping, para o projeto de sistema de diagnóstico de falhas para aplicações aeroespaciais.

Utilizando como estudo de caso o sistema de acionamento eletro-hidráulico de superfície de controle da aeronave F-16, verifica-se as principais vantagens e limitações desta abordagem.

Os resultados apresentados comprovaram a viabilidade de aplicação da abordagem, ressaltando algumas limitações. Entre elas destaca-se a necessidade de desenvolvimento de rotinas que permitam a definição do modelo por meio de composição de submodelos ou múltiplos instantiamentos de um mesmo modelo.

Além disso, ao longo das diversas etapas do projeto, a existência de arquitetura redundante no sistema monitorado poderia ser explorada para reduzir a complexidade do projeto do sistema de diagnóstico.

Trabalhos futuros serão desenvolvidos na direção de avaliar a eficiência dos resíduos incluindo a presença de ruído nos sinais provenientes dos sensores, pequenas variações no valor atribuído a parâmetros do modelo e variação na intensidade das falhas injetadas.

Adicionalmente, será também realizada comparação do sistema projetado com uma solução que permita isolabilidade completa das falhas modeladas, obtida por meio da inclusão de sensores de vazão.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Isermann and P. Ballé, "Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 709–719, May 1997.
- [2] A. Dahleni Kraemer and E. Villani, "On the gap between aircraft FDI methods in industry and academy: challenges and directions," 2019.
- [3] E. Frisk, M. Krysander, and D. Jung, "A Toolbox for Analysis and Design of Model Based Diagnosis Systems for Large Scale Models," *IFAC-PapersOnLine*, 2017.
- [4] B. Eriksson, P. Nordin, and P. Krus, "Hopsan NG, A C++ Implementation Using The TLM Simulation Technique," in *The 51st Conference on Simulation and Modelling (SIMS)*, 2010.
- [5] Ding, S. X. (2008). Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms, and tools. In *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76304-8>
- [6] Krysander, M. (2006). Design and Analysis of Diagnosis Systems Using Structural Methods. Linköping University, Sweden.
- [7] A. L. Dulmage and N. S. Mendelsohn, "Coverings of Bipartite Graphs," *Can. J. Math.*, no. 10, pp. 517–534, 1958.
- [8] Henry, D., Cieslak, J., Zolghadri, A., & Efimov, D. (2014). A non-conservative $H - / H \infty$ solution for early and robust fault diagnosis in aircraft control surface servo-loops. *Control Engineering Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.12.010>
- [9] Van Eykeren, L., & Chu, Q. P. (2014). Sensor fault detection and isolation for aircraft control systems by kinematic relations. *Control Engineering Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.017>
- [10] J. Cieslak, D. Efimov, A. Zolghadri, A. Gheorghe, P. Goupil, and R. Dayre, "A method for actuator lock-in-place failure detection in aircraft control surface servo-loops," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014.
- [11] A. Macaluso and G. Jacazio, "Prognostic and Health Management System for Fly-by-wire Electro-hydraulic Servo Actuators for Detection and Tracking of Actuator Faults," in *Procedia CIRP*, 2017.
- [12] Eich, J; Sattler, B (1997). Fault tolerant control system design using robust control techniques. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 30, n. 18, pp. 1237-1242. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)42566-3.
- [13] P. Polverino, E. Frisk, D. Jung, M. Krysander, and C. Pianese, "Model-based diagnosis through Structural Analysis and Causal Computation for automotive Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell systems," *J. Power Sources*, vol. 357, pp. 26–40, 2017.
- [14] Lannerhed, P. (2017). Structural Diagnosis Implementation of Dymola Models using Matlab Fault Diagnosis Toolbox. Linköping University, SE-581–83 Linköping.