

REDES DE PETRI APLICADAS NA ANÁLISE DE ALGORITMO DE PURGA PARA ENSAIO DE MOTOR-FOGUETE COM PROPELENTE LÍQUIDO

Evandro Rostirolla Bortoloto ¹, Francisco Carlos Parquet Bizarria ², José Walter Parquet Bizarria ³

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil. e-mail: evandrobor@gmail.com

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil. e-mail: fcpbiz@gmail.com

³ Universidade de Taubaté, Brasil. e-mail: jwpbiz@gmail.com

Resumo

Em fase anterior ao voo, são realizados ensaios instrumentados em solo para comprovar a capacidade operacional de motor-foguete a propelente líquido. A tarefa de elaborar projeto para Banco de Ensaios desse tipo de unidade propulsora é complexa e envolve várias etapas, sendo que uma dessas etapas está relacionada com a análise da capacidade desse banco em atender os algoritmos para a execução completa de ensaios, a qual é considerada fundamental para o êxito operacional desse projeto. Decorrente dos elevados custos envolvidos na elaboração e execução desse projeto, é estratégico utilizar recursos computacionais para avaliar por simulação as principais funcionalidades operacionais que são previamente estabelecidas para esse banco possuir. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma proposta de modelo por meio das Redes de Petri para avaliar, por simulação computacional, a capacidade de uma arquitetura que foi idealizada para Banco de Ensaios em atender um algoritmo dedicado à purga dos dutos de propelente líquido durante a realização de ensaios com o motor-foguete. O método utilizado para realizar a simulação mostra a resposta operacional de cada módulo dessa arquitetura, em conformidade com os passos contidos no algoritmo de purga, o que permite analisar para cada evento as propriedades das Redes de Petri, principalmente, aquelas que estão relacionadas com a conservação, a vivacidade e os conflitos do tipo mortal e confusão. Os resultados satisfatórios obtidos nessas simulações sugerem que os módulos previstos para essa arquitetura são suficientes e apropriados para realizarem todos os passos contidos no algoritmo de purga, o que minimizará ou eliminará os transtornos que podem ser causados pela presença de elementos estranhos nas linhas de suprimento de propelente, durante a realização dos ensaios com o motor-foguete.

Palavras-chave: Redes de Petri; Algoritmo de Purga; Motor Foguete; Propelente Líquido.

Abstract

In the phase prior to the flight, instrumented tests are carried out on the ground to prove the operational capacity of a liquid propellant rocket engine. The task of elaborating a project for a Test Bench of this type of propulsion unit is complex and involves several steps, one of which is related to the analysis of the capacity of this bench to meet the algorithms for the complete execution of tests, which is considered fundamental to the operational success of this project. Due to the high costs involved in the elaboration and execution of this project, it is strategic to use computational resources to evaluate by simulation the main operational functionalities that are previously established for this bench full fill. In this context, this work presents a model proposal using Petri Nets to evaluate, by computer simulation, the ability of an architecture that was idealized for the Test Bench to meet an algorithm dedicated to the purge of liquid propellant ducts during the realization of tests with the rocket engine. The method used to perform the simulation shows the operational response of each module of this architecture, in accordance with the steps contained in the purge algorithm, which allows the analysis of the properties of the Petri Nets for each event, especially those related to the conservation, vivacity, and mortal-type conflicts and confusion. The satisfactory results obtained in these simulations suggest that the modules foreseen for this architecture are sufficient and appropriate to carry out all the steps contained in the purge algorithm, which will minimize or eliminate the inconveniences those can be caused by the presence of foreign elements in the supply lines of propellant during the tests with the rocket engine.

Keyword: Petri Nets; Purging Algorithm; Rocket Engine; Liquid Propellant.

1. Introdução

O atual nível de desenvolvimento tecnológico tem possibilitado ao ser humano realizar a exploração espacial com foguetes que utilizam, principalmente, unidades propulsoras baseadas em propelente líquido para gerar o empuxo necessário durante a operação do veículo [1].

A experiência histórica sustenta a importância em realizar testes instrumentados em solo para determinar a eficácia e eficiência operacional dessas unidades propulsoras, durante as etapas de desenvolvimento, qualificação, certificação e aceitação, visando demonstrar a aceitabilidade dos sistemas que compõe o conjunto motor-foguete [2]. Em sua maioria, esses testes são realizados em instalações denominadas Banco de Ensaio, as quais devem ser flexíveis e modulares para suportar o aumento de funcionalidades, realizar testes com o aludido conjunto e coletar parâmetros essenciais de desempenho das unidades propulsoras [3].

A tarefa de elaborar projetos para atender instalações dessa natureza são consideradas complexas e realizadas em várias etapas, sendo uma dessas relacionada aos algoritmos estabelecidos para a execução completa dos ensaios com o motor-foguete, a qual é considerada fundamental para o êxito operacional desse projeto [4].

Dentre esses algoritmos, está contida uma sequência lógica, finita e não ambígua de instruções utilizada para operar as válvulas de controle de fluxo do gás inerte utilizado no sistema de purga das linhas de propelentes do motor-foguete, realizada para garantir a limpeza efetiva dessas linhas e, assim, evitar a presença de corpos estranhos e mistura volátil nos dutos [5][6].

Considerando as características da aplicação, é possível utilizar o método de modelagem gráfica, com sustentação matemática, denominado por Redes de Petri, o qual possibilita visualizar as dependências dos pares no sistema, testar propriedades, realizar análise de desempenho, simular eventos discretos, entre outros [7].

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma proposta de modelo por meio das Redes de Petri para avaliar, por simulação computacional, a capacidade de uma arquitetura que foi idealizada para Banco de Ensaio em atender um algoritmo dedicado à purga dos dutos de propelente líquido durante a realização de ensaios com o motor-foguete.

2. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são: i) apresentar uma proposta de modelo por Redes de Petri para simular os passos estabelecidos no algoritmo que realiza a purga de dutos que atendem as linhas de suprimento de propelente para motor-

foguete em Banco de Ensaio, e ii) mostrar os resultados mais relevantes que foram obtidos com os testes de validação desse algoritmo.

3. Banco de Ensaio

Estas instalações podem ser segmentadas em três partes principais: i) sistema hidráulico, ii) sistema de controle e supervisão, e iii) infraestrutura de operação e apoio, sendo que nessa última está contido o pórtico responsável por suportar a força de empuxo gerada durante a operação de unidades propulsoras [8].

Tipicamente, o Banco de Ensaio deve possibilitar a instalação e testes de diferentes modelos e/ou famílias de motores-foguetes, além de prover a integração com demais elementos do sistema, tais como reservatórios, tubulações, válvulas de controle, sensores, atuadores, reguladores, instrumentos de telemetria, circuito de refrigeração, entre outros, conforme exemplo apresentado na Figura 1 [9].



Figura 1. Banco de Ensaio de motor-foguete.
Fonte: Darpa (2018).

Entre as diversas atividades que podem ser realizadas nessas instalações, destacam-se aquelas pertinentes a fase de desenvolvimento, integração, validação e certificação de novos motores, permitindo avaliar, principalmente, os parâmetros relacionados a: i) empuxo, ii) vazão de massa, iii) temperatura, iv) vibração, v) estabilidade do conjunto quando submetido ao limite das solicitações, e iv) garantia que todos os elementos de hardware e software atendam os requisitos estabelecidos para o projeto [10].

4. Sistema de Purga

Em sua maioria, o sistema que realiza a purga de dutos que atendem as linhas de suprimento de propelente para motor-foguete em Banco de Ensaio comanda, monitora e controla o acionamento de válvulas, reguladores de pressão e outros elementos contidos na instalação antes da ignição do corpo de prova, com a meta de expelir

partículas estranhas e misturas voláteis, limpando efetivamente a última secção desses dutos que atendem o motor.

Após a operação a quente do propulsor, o sistema é novamente acionado para prover a remoção de combustível e oxidante residuais nas linhas de suprimento, os quais representam potenciais riscos de combustão e/ou contato acidental devido ao vazamento e evaporação, durante o manuseio dos componentes conectados no motor-foguete [11].

5. Redes de Petri

Este método de modelagem gráfica, com fundamentação matemática, foi apresentado na década de 60 por Carl Adam Petri na tese de doutorado *Kommunikatin Mit Automaten* (Comunicação com Autômatos), defendida na Faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt, Alemanha, para estudo de sistemas dinâmicos e eventos discretos, como alternativa para evitar a explosão de estado existente na representação gráfica de sistemas modelados por autômatos [12].

Considerando o formalismo matemático, as Redes de Petri podem ser definidas como uma quintupla, conforme representado na equação 1, pois possuem grafos direcionados, bipartidos e ponderados, contendo um nó de posição e outro de transição, conectados por arcos orientados no modelo [13][14].

$$RP = (P, T, A, W, M_0) \quad 1$$

As nomenclaturas contidas nas equações 1 possuem os seguintes significados:

RP = Redes de Petri.

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$: conjunto finito de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$: conjunto finito de transições.

$A \subset (P \times T) \cup (T \times P)$: conjunto finito de arcos.

$W: F \rightarrow N^+$: função que atribui o peso de cada arco.

$M_0: P \rightarrow N$: função de marcação inicial.

6. Desenvolvimento

A elaboração de proposta de modelo por Redes de Petri para representar o processo de purga das linhas de suprimento de propelente durante a avaliação operacional do motor-foguete em Banco de Ensaio necessita preliminarmente que sejam estabelecidas as seguintes definições: i) arquitetura física que será utilizada para realizar a purga, ii) algoritmo contendo os passos essenciais para purga de propelente, e iii) recursos computacionais, hardware e software, necessários para realizar as simulações pertinentes.

6.1. Arquitetura Física do Sistema de Purga

Neste trabalho é considerado como exemplo de arquitetura física para realizar a purga de dutos de linhas de propelente líquido de motor-foguete em Banco de Ensaio os elementos estabelecidos no diagrama apresentado na Figura 2.

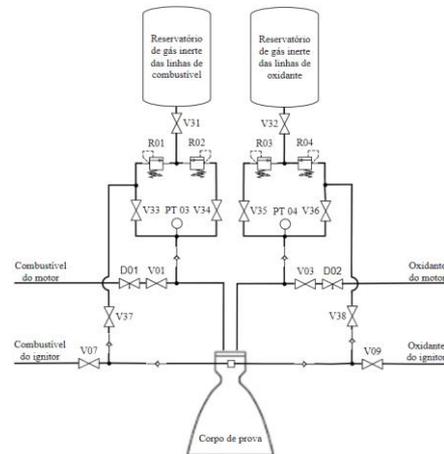


Figura 2. Arquitetura do sistema de purga. Fonte: Elaboração própria (2022).

Os acrônimos definidos para os elementos contidos na aludida arquitetura possuem os significados e as características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Elementos da arquitetura

Nome	Descrição
V01	Válvula aplicada no controle do fluxo de combustível fornecido ao motor-foguete.
V03	Válvula aplicada no controle do fluxo de oxidante fornecido ao motor-foguete.
V07	Válvula aplicada no controle do fluxo de combustível fornecido ao ignitor do motor.
V09	Válvula aplicada no controle do fluxo de oxidante fornecido ao ignitor de gás dinâmico.
V31	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte do sistema de purga das linhas de combustível.
V32	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte do sistema de purga das linhas de oxidante.
V33	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em baixa pressão da linha de combustível do motor-foguete.
V34	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em alta pressão da linha de combustível do motor-foguete.
V35	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em alta pressão da linha de oxidante do motor-foguete.
V36	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em baixa pressão da linha de oxidante do motor-foguete.
V37	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em baixa pressão da linha de combustível do ignitor do motor.
V38	Válvula aplicada no controle do fluxo de gás inerte durante o processo de purga em baixa pressão da linha de oxidante do ignitor do motor.
R01	Regulador aplicado no ajuste da baixa pressão do gás inerte que atende as linhas de purga de combustível do motor-foguete e ignitor do motor.

Nome	Descrição
R02	Regulador aplicado no ajuste da alta pressão do gás inerte que atende a linha de purga de combustível do motor-foguete.
R03	Regulador aplicado no ajuste da alta pressão do gás inerte que atende a linha de purga de oxidante do motor-foguete.
R04	Regulador aplicado no ajuste da baixa pressão do gás inerte que atende as linhas de purga de oxidante do motor-foguete e ignitor do motor.
PT03	Transdutor de pressão do gás inerte que atende a linha de purga de combustível do motor-foguete.
PT04	Transdutor de pressão do gás inerte que atende a linha de purga de oxidante do motor-foguete.
D01	Válvula aplicada no dreno de combustível da linha que atende o motor-foguete.
D02	Válvula aplicada no dreno de oxidante da linha que atende o motor-foguete.

Elaboração própria (2022).

6.2. Algoritmo de Purga

A seqüência específica de ações previstas no algoritmo que realiza a purga de dutos que atendem as linhas de suprimento de propelente para motor-foguete em Banco de Ensaio está contida no fluxograma sintético apresentado na Figura 3.

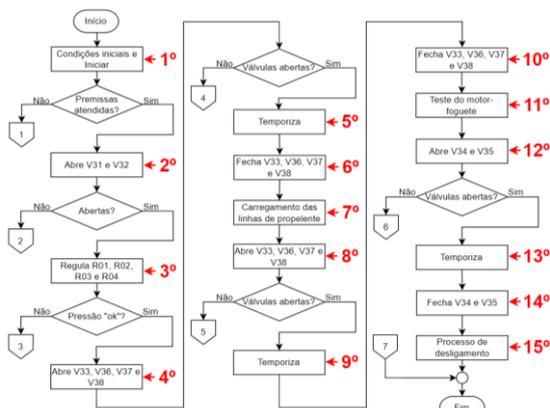


Figura 3. Algoritmo. Fonte: Elaboração própria (2022).

Os blocos de processos representados nesse fluxograma estão relacionados com os passos do algoritmo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Blocos do algoritmo

Passo	Nome	Descrição
1°	Condições iniciais e iniciar	Processo referente às etapas iniciais, tais como, seleção do programa de ensaio, abastecimento dos reservatórios, montagem do corpo de provas, teste de válvulas, inspeção visual, entre outras, e ao acionamento do comando iniciar na IHM – Interface Homem-Máquina.
2°	Abre V31 e V32	Processo referente à abertura simultânea das válvulas localizadas na saída dos reservatórios, possibilitando carregar com gás inerte os dutos das linhas do sistema de purga.

Passo	Nome	Descrição
3°	Regula R01, R02, R03 e R04	Processo referente ao ajuste da pressão de gás inerte nos dutos das linhas do sistema de purga.
4°	Abre V33, V36, V37 e V38	Processo referente à abertura simultânea das válvulas que liberam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete e ignitor do motor, dando início a purga em baixa pressão.
5°	Temporiza	Processo referente ao controle programado do tempo para o evento contido no 4° passo do algoritmo.
6°	Fecha V33, V36, V37 e V38	Processo referente ao fechamento simultâneo das válvulas que bloqueiam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete e ignitor do motor, finalizando a purga em baixa pressão.
7°	Carregamento das linhas de propelente	Processo referente ao carregamento de propelente líquido nos dutos que interligam os reservatórios ao motor-foguete e ao ignitor do motor.
8°	Abre V33, V36, V37 e V38	Processo referente à abertura simultânea das válvulas que liberam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete e ignitor do motor, dando início a purga em baixa pressão.
9°	Temporiza	Processo referente ao controle programado do tempo para o evento contido no 8° passo do algoritmo.
10°	Fecha V33, V36, V37 e V38	Processo referente ao fechamento simultâneo das válvulas que bloqueiam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete e ignitor do motor, encerrando a purga em baixa pressão.
11°	Teste do motor-foguete	Processo referente ao teste a quente do corpo de prova.
12°	Abre V34 e V35	Processo referente à abertura simultânea das válvulas que liberam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete, dando início à purga em alta pressão.
13°	Temporiza	Referente ao processo de controle programado do tempo para o evento contido no 12° passo do algoritmo.
14°	Fecha V34 e V35	Processo referente ao fechamento simultâneo das válvulas que bloqueiam o fluxo de gás inerte no último trecho das linhas de propelente do motor-foguete, encerrando a purga em alta pressão.
15°	Processo de desligamento	Processo referente à seqüência de desligamento estabelecida para os elementos dos sistemas e encerramento das atividades de teste do motor-foguete no Banco de Ensaio.

Fonte: Elaboração própria (2022).

Cabe mencionar que as decisões condicionais contidas no fluxograma mostrado na Figura 3, possuem saídas com indicação 1, 2, 3, 4, 5 ou 6, as quais remetem para sub-rotinas contendo processos específicos para tratamento de cada um desses eventos, os quais não são abordados neste trabalho, entretanto, após a possível execução dessas sub-rotinas o fluxo principal de ações retorna para o conector com indicação 7.

6.3. Modelo por Redes de Petri

O modelo completo elaborado para representar os principais estados operacionais que podem ser estabelecidos no sistema que realiza a purga de dutos que atendem as linhas de suprimento de propelente para motor-foguete em Banco de Ensaios, em conformidade com a arquitetura física

e algoritmo previamente definidos, é apresentado na Figura 4.

Nesse modelo é representado de maneira distinta, as Redes de Petri, de baixo nível, elaboradas para atenderem as seguintes camadas de automação para o sistema de purga: 1) IHM – Interface Homem-Máquina, 2) Controle e 3) Sensor Atuador. Nesse contexto, cabe destacar que essa técnica para realizar a modelagem de sistemas é baseada em publicações acadêmicas específicas da área, as quais retratam em maior nível de detalhes a condição real, natureza dos sistemas e dinâmica operacional relacionada [15][16].

Para elaborar o modelo por Redes de Petri e realizar as respectivas análises apresentadas neste trabalho, foram utilizados os recursos do ambiente integrado de desenvolvimento denominado Visual Object Net [17].

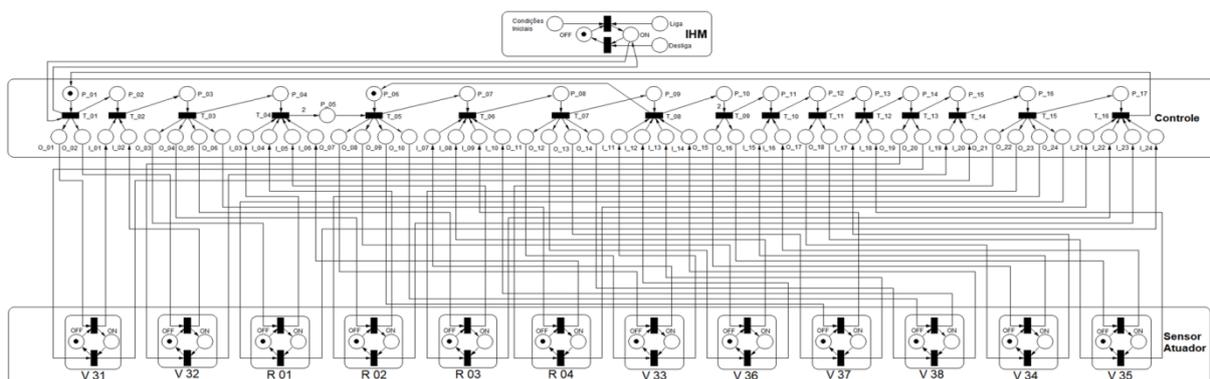


Figura 4. Redes de Petri completa para sistema de purga. Fonte: Elaboração própria (2022).

A distribuição de posições, transições, conexão de arcos e quantidades de fichas, mostrada no modelo da Figura 4, compõe a proposta de modelo apresentada neste trabalho para avaliar o sistema de purga, na qual são consideradas as seguintes características:

Na camada Interface Homem-Máquina (IHM), estão previstos os seguintes estados operacionais:

- Condições iniciais: indica que as etapas anteriores para realização do ensaio foram atendidas, como por exemplo a instalação de corpo de prova no pórtilo, carregamento de reservatórios etc.
- Liga: comando para iniciar o processo de purga em modo automático.
- Desliga: comando para finalizar a sequência do algoritmo de purga.
- OFF: posição que indica ao usuário que o sistema de purga está desativado.
- ON: posição que indica ao usuário o estado de operação do sistema purga.

Na camada Controle, mostrada na Figura 4, estão previstos os seguintes recursos para efetuar o controle da arquitetura mostrada na Figura 2:

- I_01 ... I_NN: entradas de sinais relacionados com a retroalimentação.
- P_01 ... P_XX e T_01 ... T_YY: são os pares relacionados com os passos estabelecidos no algoritmo da Figura 3.
- O_01 ... O_RR: saídas de sinais para ativação dos atuadores da camada Sensor/Atuador, contidos na Figura 2.

Na camada Sensor/Atuador, estão previstos os seguintes estados operacionais:

- ON: posição para indicar que as válvulas estão abertas e os reguladores de pressão atuando conforme parametrizado.
- OFF: posição para indicar que as válvulas estão fechadas e os reguladores de pressão não estão operando.

6.4. Simulação

A distribuição das fichas, mostradas no modelo da Figura 4, retrata um determinado estado das Redes de Petri que é considerado neste trabalho como condição inicial para executar a simulação dos passos contidos no algoritmo de purga.

A partir desse estado e, também, sendo atendidas as “Condições iniciais” de ensaio e ativado o comando “Liga” pelo usuário na Interface Homem-Máquina (IHM), essa rede evolui para um novo estado que é apresentado na Figura 5. Nesse novo estado a posição “ON” da camada IHM é ativada para

indicar ao usuário que o algoritmo de purga está sendo simulado no ambiente integrado de desenvolvimento, com a acionamento das saídas O_01 e O_02 na camada de Controle, as quais são ações referentes ao primeiro passo (1º) do algoritmo mostrado na Figura 3.

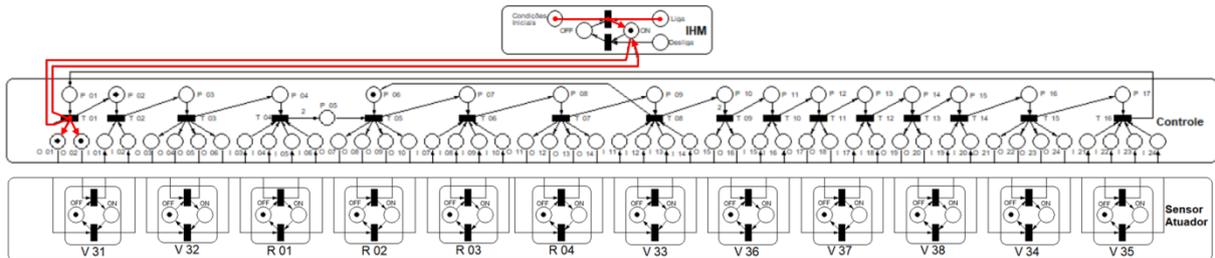


Figura 5. Primeiro passo do algoritmo – Iniciar simulação. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o segundo passo (2º) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 6. Nesse estado as válvulas V31 e V32 mudam da condição fechada (OFF) para aberta (ON), com o envio simultâneo de sinais realimentação para as entradas I_01 e I_02, as quais

pertencem à camada de Controle. As aberturas dessas válvulas liberam o fluxo de gás inerte, que está com pressão positiva nos respectivos reservatórios, para preencherem as tubulações do sistema de purga das linhas de propelentes até as entradas das válvulas V34, V36, V37 e V38.

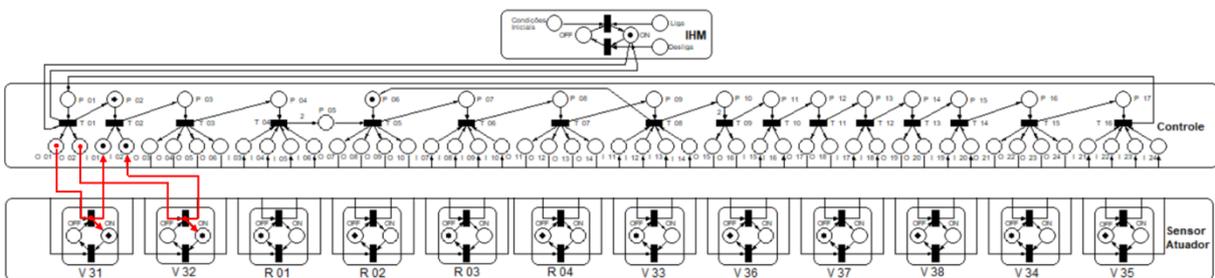


Figura 6. Segundo passo do algoritmo – Abrir válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o terceiro passo (3º) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 7. Nesse estado, são acionadas as saídas O_03, O_04, O_05 e O_06 na camada de Controle, as quais ativam os reguladores de pressão R01, R02, R03 e R04, conforme valores parametrizados nas “Condições Iniciais” e mudam da condição fechada (OFF) para aberta (ON), com o envio simultâneo de sinais de realimentação para as

entradas I_03, I_04, I_05 e I_06, as quais pertencem à camada de Controle. A ativação dos reguladores R_01 e R_04 definem baixa pressão de gás inerte para as linhas de propelentes que suprem o subsistema de inicialização do motor-foguete, enquanto os reguladores R_02 e R_03 definem alta pressão de gás inerte para as linhas principais de propelentes que suprem o motor-foguete durante a sua operação.

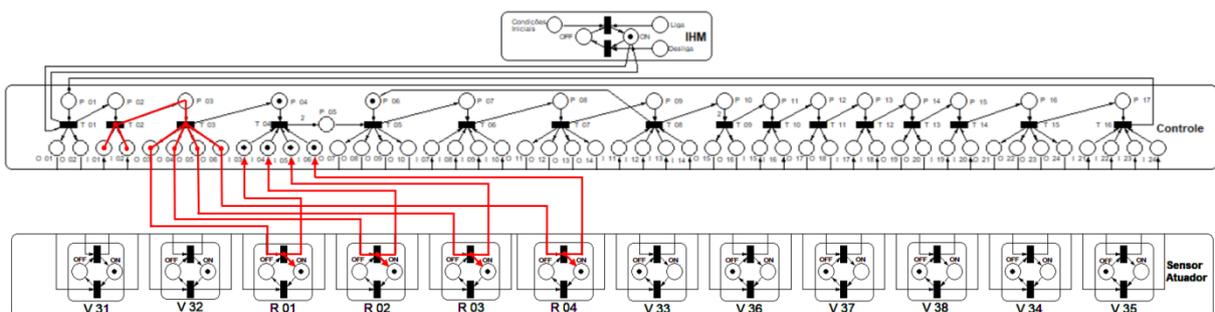


Figura 7. Terceiro passo do algoritmo – Ativar reguladores. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o quarto passo (4º) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 8. Nesse estado, são acionadas as saídas O_07, O_08, O_09 e O_10 na camada de Controle, as quais ativam as válvulas V33, V36, V37 e V38, mudando da condição fechada (OFF) para aberta (ON), com o envio simultâneo de sinais realimentação para as entradas I_07, I_08, I_09 e I_10, as quais pertencem à camada de Controle.

A abertura dessas válvulas promove a purga das linhas de propelentes do subsistema de inicialização e linhas principais que atendem o motor-foguete, com a meta de realizar a limpeza efetiva dessas linhas e, assim, eliminar a presença de corpos estranhos e mistura volátil.

Cabe mencionar que o quinto passo (5º) do algoritmo corresponde à manutenção do estado representado no quarto passo (4º) por um período de tempo parametrizado nas “Condições Iniciais”.

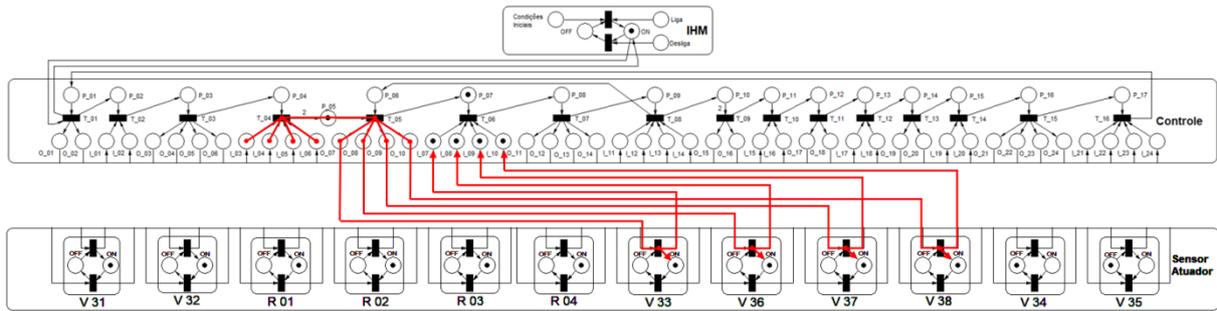


Figura 8. Quarto passo do algoritmo – Abrir válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o sexto passo (6º) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 9. Nesse estado, são acionadas as saídas O_11, O_12, O_13 e O_14 na camada de Controle, as quais desativam as válvulas V33, V36, V37 e V38, mudando da condição aberta (ON) para fechada (OFF), com o envio simultâneo de sinais realimentação para as entradas I_11, I_12, I_13 e I_14, as quais pertencem a camada Controle.

subsistema de inicialização e linhas principais que atendem o motor-foguete.

Cabe mencionar que: i) o sétimo passo (7º) do algoritmo corresponde ao procedimento de carregamento das linhas de suprimento de propelentes, o qual não é abordado neste trabalho, ii) o oitavo passo (8º), nono passo (9º) e décimo passo (10º) refletem respectivamente os mesmos estados mostrados no quarto passo (4º), quinto passo (5º) e sexto passo (6º), e iii) o décimo primeiro passo (11º) corresponde ao procedimento para o ensaio operacional do motor-foguete.

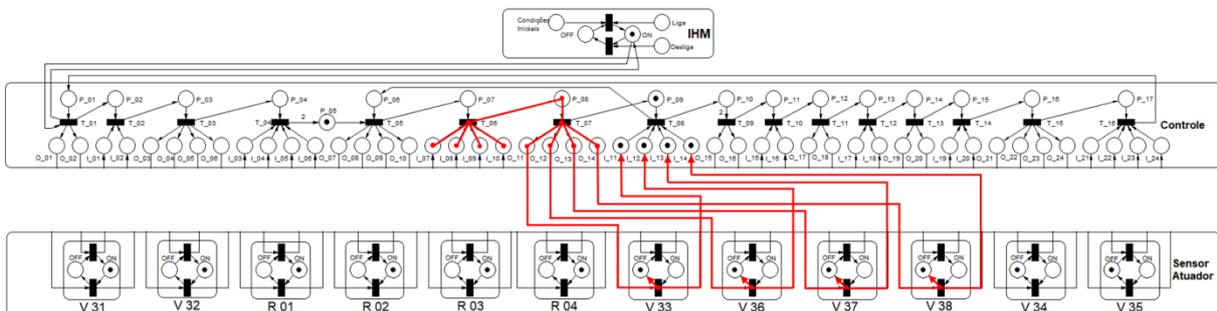


Figura 9. Sexto passo do algoritmo – Fechar válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o décimo segundo passo (12º) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 10. Nesse estado, são acionadas as saídas O_15 e O_16 na camada de Controle, as quais ativam as válvulas V34 e V35, mudando da condição fechada (OFF) para aberta (ON), com o envio simultâneo de sinais realimentação para as entradas I_15 e I_16, as quais pertencem à camada de Controle.

A abertura dessas válvulas promove a purga em alta pressão das linhas principais de propelentes que atendem o motor-foguete, com a meta de prover a remoção de combustível e oxidante residuais nessas linhas decorrentes do ensaio realizado.

Cabe mencionar que o décimo terceiro passo (13º) do algoritmo corresponde à manutenção do estado representado no décimo segundo passo (12º) por um período de tempo parametrizado nas “Condições Iniciais”.

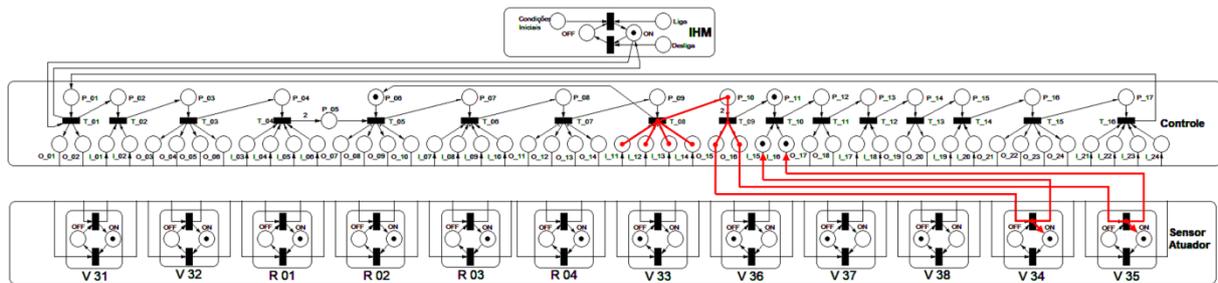


Figura 10. Décimo segundo passo do algoritmo – Abrir válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o décimo quarto passo (14^o) do algoritmo, a rede evolui para o estado que é apresentado na Figura 11. Nesse estado, são acionadas as saídas O_17 e O_18 na camada de Controle, as quais desativam as válvulas V34 e V35, mudando da condição aberta (ON) para

fechada (OFF), com o envio simultâneo de sinais realimentação para as entradas I_17 e I_18, as quais pertencem à camada de Controle.

O fechamento dessas válvulas define o final desta fase de purga das linhas principais de propelentes que atendem o motor-foguete após o ensaio.

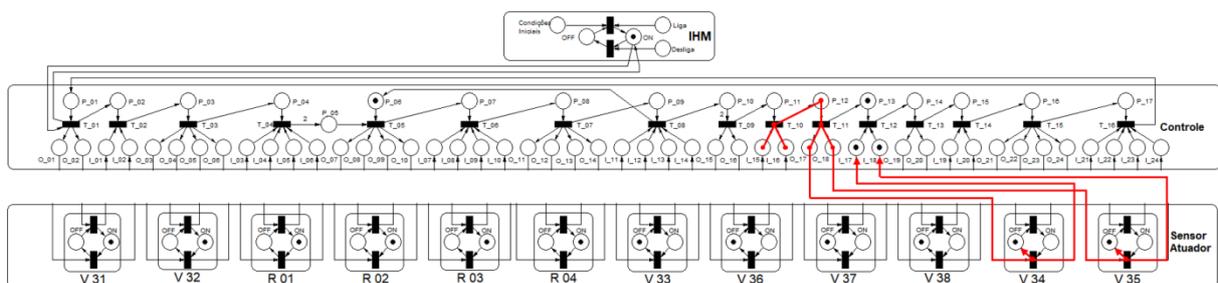


Figura 11. Décimo quarto passo do algoritmo – Fechar válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

Para atender o décimo quinto passo (15^o) do algoritmo, a rede evolui para os três estados subsequentes, sendo que, no estado apresentado na Figura 12 são acionadas as saídas O_19 e O_20 na camada de Controle, as quais desativam as válvulas V31 e V32, mudando da condição aberta (ON) para fechada (OFF), com o envio simultâneo de sinais

realimentação para as entradas I_19 e I_20, as quais pertencem à camada de Controle.

O fechamento dessas válvulas bloqueia o fluxo de gás inerte que está com pressão positiva nos respectivos reservatórios, o qual é utilizado para atender o sistema de purga das linhas de propelentes até as válvulas V34, V36, V37 e V38.

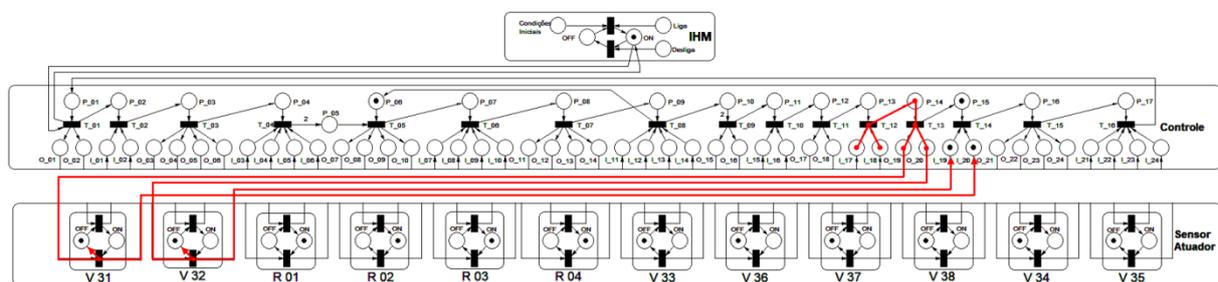


Figura 12. Décimo quinto passo do algoritmo – Fechar de válvulas. Fonte: Elaboração própria (2022).

No estado apresentado na Figura 13 são acionadas as saídas O_21, O_22, O_23 e O_24 na camada de Controle, as quais desativam os reguladores de pressão R01, R02, R03 e R04, os quais mudam da condição aberta (ON) para fechada (OFF), com o envio simultâneo de sinais de realimentação para as

entradas I_21, I_22, I_23 e I_24, as quais pertencem à camada de Controle.

Com a desativação desses reguladores ocorre o equilíbrio da pressão nas linhas de propelentes que suprem o subsistema de inicialização e linhas principais que atendem o motor-foguete.

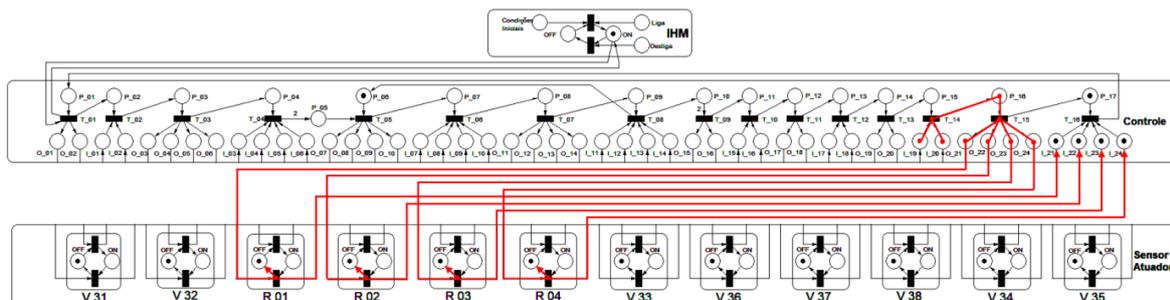


Figura 13. Décimo quinto passo do algoritmo – Desativar reguladores. Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir do estado mostrado na Figura 13 e sendo ativado o comando “Desliga” pelo usuário na Interface Homem-Máquina (IHM), a rede evolui para o novo estado que é apresentado na Figura 14, no qual, a posição “OFF” da camada IHM é ativada para indicar ao usuário que a simulação do

algoritmo de purga está sendo finalizado no ambiente integrado de desenvolvimento, sendo acionada a posição P_01 na camada de Controle, a qual fornece condição para que seja reiniciada uma nova simulação, a partir das ações referentes ao primeiro passo (1º) do algoritmo.

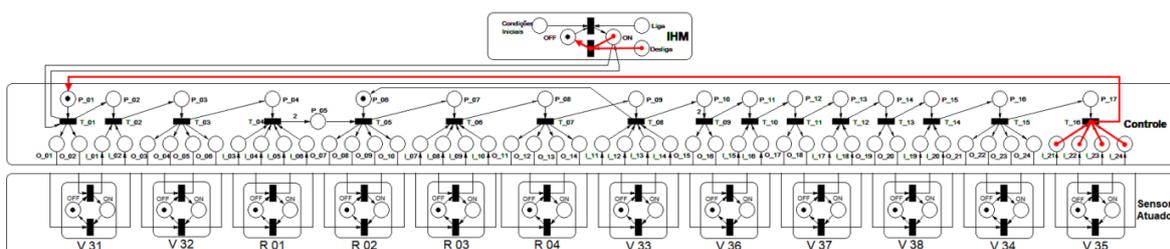


Figura 14. Décimo quinto passo do algoritmo – Finalizar simulação. Fonte: Elaboração própria (2022).

6.5. Avaliação de Propriedades

A simulação computacional realizada com o modelo proposto neste trabalho, para representar o processo de purga de dutos de linhas de propelente líquido que atendem o motor-foguete em Banco de

Ensaio, foi repetida por completa diversas vezes, permitindo avaliar as propriedades das Redes de Petri relacionadas, principalmente, com Vivacidade, Conservação, Conflitos do Tipo Confusão e Mortal, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Avaliação de propriedades

Propriedade	Descrição	Resultado
Vivacidade	Indica que todas as transições da rede são disparáveis a partir de uma sequência de disparos.	Todas as transições foram habilitadas e disparadas durante a simulação realizada no modelo por Redes de Petri proposto neste trabalho.
Conservação	Indica a existência de um vetor de ponderação de marcas, no qual, todo lugar possui um número inteiro e positivo.	Durante a execução completa da simulação a quantidade de fichas permaneceu constante no modelo por Redes de Petri proposto para este trabalho.
Conflito tipo Confusão	Indica que múltiplas transições conectadas e habilitadas ao mesmo lugar de entrada competem pela ficha nesse contida.	Na simulação realizada foi observada a presença do conflito tipo confusão no modelo por Redes de Petri proposto neste trabalho. Essas situações foram solucionadas com inserções estratégicas de posições para que o algoritmo seja corretamente executado.
Conflito tipo Mortal	Indica a parada de todas as transições da rede em um determinado estado.	Na simulação realizada não foi observada a presença do conflito tipo mortal no modelo por Redes de Petri proposto neste trabalho.

Fonte: Elaboração própria (2022).

7. Conclusões

Os resultados positivos observados nos testes realizados com a simulação computacional sugerem que os recursos e componente estabelecidos no modelo proposto por Redes de Petri neste trabalho são compatíveis com a arquitetura do sistema de purga de dutos que atendem as linhas de suprimento

de propelente para motor-foguete em Banco de Ensaio.

O método utilizado para elaborar o mencionado modelo por Redes de Petri permitem: i) retratar adequadamente a arquitetura física do sistema de purga, ii) executar os passos contidos no algoritmo que foi previamente definido, iii) avaliar diferentes propriedades das Redes de Petri, iv) representar os

estados operacionais do sistema, v) realizar de análise individualizada de cada elemento, vi) identificar possíveis desconformidades na estrutura e execução da rede e, vii) mitigar eventos indesejáveis durante a execução das rotinas de ensaio.

A forma adotada para efetuar a modelagem do sistema, na qual são representados de modo distinto as camadas de: Interface Homem-Máquina, Controle e Sensor/Atuador que compõem as Redes de Petri de baixo nível, permite explicitar a operação das válvulas e reguladores, os quais são elementos previstos na arquitetura do mencionado sistema.

Das propriedades avaliadas na rede modelada, somente o conflito do tipo confusão foi identificado na simulação do sistema, sendo que a solução para o mesmo foi obtida com inserções estratégicas de posições para que o algoritmo seja corretamente executado.

Como ação imprescindível para impedir, minimizar ou eliminar transtornos que podem ocorrer caso o sistema alcance algum estado indesejado, é necessário, no mínimo, garantir a existência de sinais de realimentação para o sistema de controle.

8. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

9. Referencias

[1] D. S. Almeida. Projeto motor foguete a propelente líquido L75. In: 7th Seminário de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologia Associadas. 50 p. São José dos Campos, SP. 2013.

[2] S. Rahman. Liquid Rocket Engines. In: 41th Joint Propulsion Conference. 57 p. Tuscon, Arizona. 2005.

[3] P. Beck. Payload user's guide. v 6.2, 53 p. Rocket Lab, California. 2018.

[4] A. Iannetti, J. Marzat, H. Piet-Lahner, G. Ordonneau, L. Vingert. Fault diagnosis benchmark for a rocket engine demonstrator. Elsevier, v. 48, n. 21, p. 895 – 900, 2015.

[5] M. Schwabacher. Machine Learning for Rocket Propulsion Health Monitoring. SAE Transactions, v. 114, n.1, p. 1192 – 1197, 2005.

[6] M. J. L. Turner. Rocket and spacecraft propulsion: Principles, practice and new developments. 3^a ed. Springer, Chichester, UK. 2009.

[7] J. Cardoso, R. Valette. Redes de Petri. 1^a ed. UFSC, Florianópolis. 1997.

[8] L. F. Favaro, P. A. A. M. Junior. Análise Pelo Método de Elementos Finitos da Estrutura do Banco de Testes de Motor de Foguete. In: 35th Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. 15 p. Fortaleza. 2014.

[9] Darpa – Defense Advanced Research Projects Agency (2018). Experimental Spaceplane Program Successfully Completes Engine Test Series [online]. Disponível em: <https://www.darpa.mil/news-events/2018-07-10>.

[10] C. Sarotti, J. Marzat, H. Piet-Lahanier, M. Galeotta. Cryogenic liquid rocket engine teste beach fault-tolerant control system: Cooling system application. Elsevier, v. 52, n. 12, p. 280 – 285, 2019.

[11] A. Deyna. Concepção e projeto de uma bancada de testes para injetores de fluídos criogênicos em condições críticas. 41 f. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.

[12] F. M. Barreto. Uma abordagem baseada em Redes de Petri para modelagem, análise e simulação de cenários de vídeo games singlepauer e multiplayer. 137 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2020.

[13] S. I. D. Pádua, A. R. Y. Silva, A. J. V. Porto. O potencial das Redes de Petri em modelagem e análise de processos de negócio. Revista de Gestão & Produção, v. 11, n. 1, p. 109 – 119, 2004.

[14] C. C. Moraes, P. L. Castrucci. Engenharia de automação industrial. 2^o ed. LTC, Rio de Janeiro. 2018.

[15] F. C. P. Bizarria, J. W. P. Bizarria, E. Villani, A. P. Rangel. Redes de Petri aplicadas na análise de sistema de adição de agente oxidante no processo de fabricação de propelente sólido. 5th Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 8 p. Salvador, BH. 2008.

[16] F. C. P. Bizarria, J. W. P. Bizarria, J. M. Rosario. Petri Nets applied to the analysis of algorithm for space vehicles integration tower self test. Global Journal of Reserches in Engineering, v. 11, n. 5, 7 p. 2011.

[17] R. Drath. Visual Object Net, 2022 [online]. Disponível em: https://www.r-drath.de/Drath/Home/Visual_Object_Net++.html