



# ANÁLISE POR REDES DE PETRI DE PROPOSTA PARA AUTOMATIZAR ENSAIOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS EMBARCADOS<sup>1</sup>

FRANCISCO CARLOS PARQUET BIZARRIA | [francisco.cpbizarria@unitau.br](mailto:francisco.cpbizarria@unitau.br)

JOSÉ WALTER PARQUET BIZARRIA | [jwpbiz@gmail.com](mailto:jwpbiz@gmail.com)

JAIRO FERREIRA DOS SANTOS FILHO | [jairoferreira05@yahoo.com.br](mailto:jairoferreira05@yahoo.com.br)

## RESUMO

Os equipamentos eletroeletrônicos utilizados em foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélites, atualmente desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), são geralmente submetidos aos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação. Esses ensaios são realizados por equipe técnica especializada que executa extensa sequência de atividades. Essas atividades exigem, dos membros dessa equipe, constantes avaliações visuais, anotações e intervenções em partes que formam os conjuntos montados para atender cada tipo de ensaio. Com a meta de minimizar o tempo e os esforços humanos, na realização dessas atividades, optou-se por automatizar esses ensaios. Existem várias alternativas para efetuar essa automatização, porém o sucesso na implantação de um sistema é alcançado com a análise e escolha da proposta mais adequada a sua finalidade. Essa análise pode ser realizada com o auxílio de modelos e simulações de sistemas. Os resultados obtidos nessas simulações servirão como referência para a escolha da melhor proposta que deverá ser adotada. Nesse sentido, este trabalho apresenta o modelo e os resultados obtidos na simulação de proposta para automatizar uma sequência dedicada de ações que são aplicadas nesses ensaios de equipamentos eletroeletrônicos, por meio das Redes de Petri. As principais propriedades das Redes de Petri, pertinentes a proposta estudada, são avaliadas nas simulações. Os resultados obtidos nessas simulações são apresentados neste trabalho, os quais confirmam que a elaboração de modelo e a realização de simulação podem auxiliar efetivamente na escolha de uma proposta para implantação de sistema.

**Palavras-chave:** Redes de Petri, Modelagem, Simulação, Automatização de Ensaios.

---

1 Artigo publicado no IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2006, Recife/PE.

## 1. INTRODUÇÃO

As especificações previstas para um determinado equipamento podem ser comprovadas por meio de ensaios específicos. A execução de ensaios é tarefa que acompanha o ciclo de desenvolvimento de sistemas espaciais. Os equipamentos eletroeletrônicos utilizados em foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélites, atualmente desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), são geralmente submetidos aos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação.

Transcorrido a fase de desenvolvimento desses equipamentos, os mesmos são submetidos aos ensaios de qualificação. Nesses ensaios o objetivo principal está concentrado em avaliar o comportamento de equipamento submetido ao maior nível previsto de solicitação funcional e ambiental, pois as magnitudes dos parâmetros utilizados nos ensaios de qualificação são as mais rigorosas.

Na solicitação funcional são aplicadas três sequências dedicadas de operações no equipamento avaliado, sendo que cada sequência é desempenhada com valor de tensão elétrica diferente.

A primeira sequência é realizada com o valor de tensão que é estabelecido para operação nominal do equipamento, a segunda sequência é realizada com máximo valor de sobretensão tolerável e a terceira sequência com o mínimo valor de subtensão tolerável.

Durante a realização dessas sequências, é esperado que o equipamento avaliado execute as suas funções operacionais nos três níveis de tensão.

A solicitação ambiental tem por objetivo avaliar o comportamento de equipamento submetido à condição de solicitação dinâmica, térmica e de interferência eletromagnética. Nessa avaliação também são aplicadas sequências dedicadas de operações no equipamento avaliado.

A meta dos ensaios de aceitação está concentrada na avaliação do comportamento de equipamento submetido ao nível nominal de solicitação funcional e ambiental, previsto em especificação. Esses ensaios são semelhantes aos de qualificação, porém são realizados para equipamentos montados em linha de produção, ou seja, que passaram pela fase de desenvolvimento.

Os ensaios de revalidação são aplicados em equipamentos que serão utilizados em voo, porém passaram por período de tempo, considerado longo, em estoque. O objetivo desses ensaios está concentrado principalmente em avaliar o comportamento de equipamentos submetidos aos níveis nominais de solicitação funcional. Nesses ensaios também são realizadas sequências dedicadas de operações no equipamento avaliado.

Os ensaios qualificação, aceitação e revalidação são realizados por equipe técnica especializada e que executa extensa sequência atividades. Essas atividades exigem, dos membros dessa equipe, constantes avaliações visuais, anotações e intervenções em partes que formam os conjuntos montados para atender cada tipo de ensaio.

O diagrama em blocos, apresentado na Figura 1, exemplifica as partes sistêmicas de um conjunto montado para realizar ensaios específicos em equipamentos eletroeletrônicos embarcados.

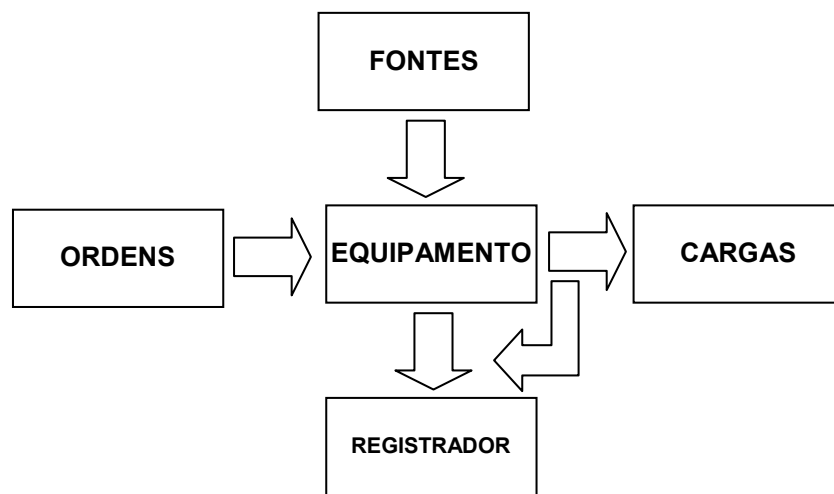


Figura 1 - Diagrama de blocos para ensaios em equipamentos.

Na Figura 1, o bloco relacionado com ordens (ORDENS) representa sequência dedicada de atuações que o operador deverá aplicar no equipamento para provocar a sua operação. Geralmente essas atuações envolvem sinais de baixa potência, seguem algoritmo específico de ensaio e podem equivaler às ordens enviadas pelo sistema de controle de eventos embarcado, no qual está contido o computador de bordo (CB).

O bloco relacionado com equipamento (EQUIPAMENTO) representa o sistema potência que, ao receber os sinais de baixa intensidade enviados pelo operador, efetua a sua amplificação e os aplica nas cargas. Essa operação é supervisionada por meio de sinais de estado enviados para o registrador de eventos.

O bloco relacionado com as cargas (CARGAS) representa os eletropirotecnos (Pinheiro, 2005) que são usualmente empregados na atuação de sistemas de iniciação e separação de estágios propulsores.

O bloco relacionado com as fontes (FONTES) representa os sistemas de suprimento de energia elétrica que são necessários para atender o funcionamento do equipamento.

O bloco relacionado com o registrador (REGISTRADOR) representa o sistema que efetua os registros de estados de operação previstos para o equipamento. Esses registros são utilizados para avaliar o comportamento do equipamento submetido aos ensaios.

Com a meta de minimizar o tempo e os esforços humanos, na execução dessas atuações, optou-se por automatizar as sequências de ações necessárias para realizar os aludidos ensaios, empregando a proposta de arquitetura sistêmica apresentada na Figura 2.

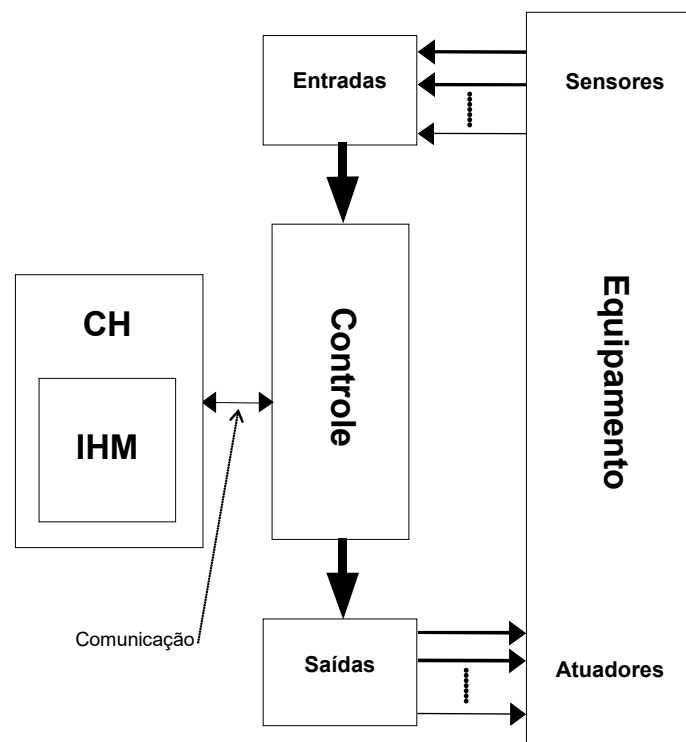


Figura 2 - Arquitetura proposta para ensaios.

Na Figura 2, a função do bloco de Controle pode ser desempenhada por Controlador Lógico Programável (Miyagi, 1996). Nesse controlador está prevista a instalação de programa que efetuará a gerência de atividades da arquitetura proposta, em função das características funcionais exigidas pelo equipamento submetido ao ensaio.

Conforme sequência de operações estabelecidas para a realização dos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação, esse programa poderá acionar atuadores e obter informações de sensores relacionadas com o equipamento submetido a esses ensaios.

Na Interface Homem-Máquina (IHM) que é instalada na camada do aplicativo (De Moraes e Castrucci, 2001) do computador hospedeiro (CH), está previsto recurso para o operador iniciar a sequência de ensaios desejada e registrar o comportamento do equipamento submetido à avaliação.

Essa interface se comunica com o Controlador Lógico Programável (CLP) por meio físico dedicado e com previsão de separação galvânica.

Tomando como base essa arquitetura de sistema, existem várias alternativas para efetuar a automatização da mencionada sequência, porém o sucesso na implantação de um sistema é alcançado com a análise e escolha da proposta mais adequada a sua finalidade. Essa análise pode ser realizada com o auxílio de modelos e simulações de sistemas. Os resultados obtidos nessas simulações servirão como referência para a escolha da melhor proposta que deverá ser adotada.

## **2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar o modelo e os resultados obtidos na simulação de proposta para automatizar uma sequência dedicada de operações aplicadas aos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação de equipamento eletroeletrônico embarcado, por meio das Redes de Petri (Cardoso e Valette, 1997). As principais propriedades das Redes de Petri, pertinentes a sequência estudada, deverão ser avaliadas nessas simulações.

## **3. MODELO DO SISTEMA**

O modelo proposto para automatização de sequência de operações utilizadas na realização dos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação está baseado na arquitetura apresentada na Figura 2, porém destinada ao equipamento designado por Módulo de Segurança e Atuação (MSA).

Esse modelo mostra, de maneira distinta, as Redes de Petri, de baixo nível (Cardoso e Valette, 1997), elaboradas para o modelo do Controlador Lógico Programável (CLP) e Módulo de Segurança e Atuação (MAS), como pode ser observado na Figura 3.

Esse modo de elaborar o modelo tem como principal objetivo permitir a observação do comportamento operacional das partes envolvidas nesse ensaio, durante a simulação do programa de gerenciamento do sistema.

É oportuno mencionar que em função da quantidade de posições, transições e arcos, contidos no referido modelo, e das limitadas dimensões disponíveis para apresentação deste trabalho, foi necessário sobrepor esses arcos para permitir a identificação das partes envolvidas.

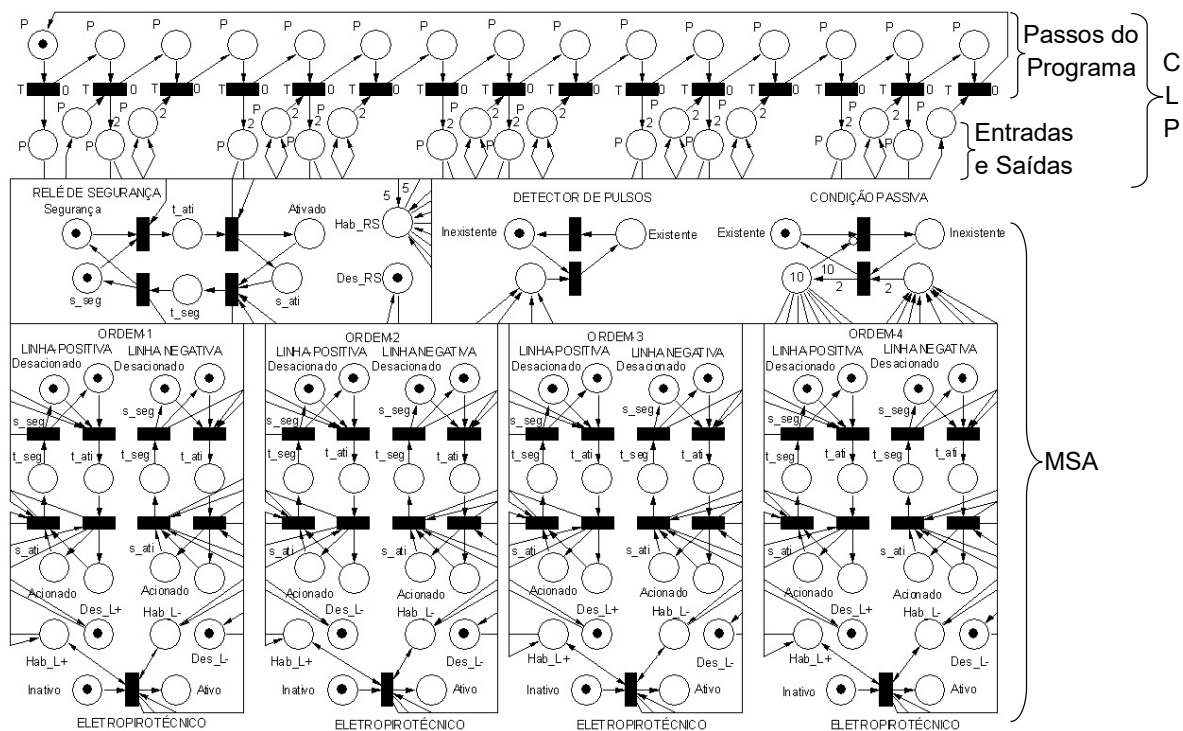


Figura 3 - Modelos por Redes de Petri.

A distribuição e quantidade de fichas, mostrada na Figura 3, estabelecem a condição inicial para operação do sistema proposto. Os possíveis estados operacionais que podem ser alcançados pelos atuadores e sensores do MSA, durante a execução do programa que gerencia a sequência de operações do sistema, são representados nessa figura por posições distintas.

As posições, transições, arcos e fichas relacionadas com o modelo elaborado para o CLP estão organizados de modo que esse execute a sequência de passos prevista no fluxograma sintético apresentado na Figura 4.

A execução dessa sequência é realizada em duas principais etapas (Garcia, 2004).

Na primeira etapa, o modelo elaborado para o CLP, de acordo com os passos previstos no programa que gerencia a sequência de operações do sistema, habilita a mudança de estado dos modelos elaborados para os atuadores do MSA.

Como consequência dessa habilitação, na segunda etapa, os modelos desses atuadores mudam de estado e essa ação atualiza os estados dos seus sensores, os quais permitem a execução do próximo passo previsto no mencionado programa.

No modelo do CLP, mostrado na Figura 3, estão previstos posições específicas (Entradas e Saídas) para efetuar a conexão com os modelos dos atuadores e sensores previstos no MSA.

O modelo elaborado para o MSA é formado por sete partes intituladas por: RELÉ DE SEGURANÇA, DETECTOR DE PULSO, CONDIÇÃO PASSIVA, ORDEM-1, ORDEM-2, ORDEM-3 e ORDEM-4.

O modelo elaborado para o RELÉ DE SEGURANÇA está relacionado com a função que esse elemento tem em permitir a realização de testes operacionais com os relés de linha positiva e negativa, de cada ordem, sem permitir a ativação dos respectivos eletropirotécnicos.

Os possíveis estados alcançados pelo modelo relacionado com o contato principal e auxiliar do RELÉ DE SEGURANÇA, durante a simulação do programa que gerencia a sequência de operações do sistema, estão indicados na Figura 3 pelas seguintes posições: Segurança (principal), Ativado (principal), t\_ati (transitório de ativação), t\_seg (transitório de desativação), s\_seg (auxiliar, posição de segurança), s\_ati (auxiliar, posição de atuação).

As posições Hab\_RS e Des\_RS representam, respectivamente, informações pertinentes aos estados de habilitação e desabilitação que o RELÉ DE SEGURANÇA impõe para as ordens, em função do seu atual estado. Essas informações são enviadas para a Interface Homem-Máquina (IHM) com o objetivo de sensibilizar ao operador do sistema sobre o atual estado operacional do RELÉ DE SEGURANÇA do MSA.

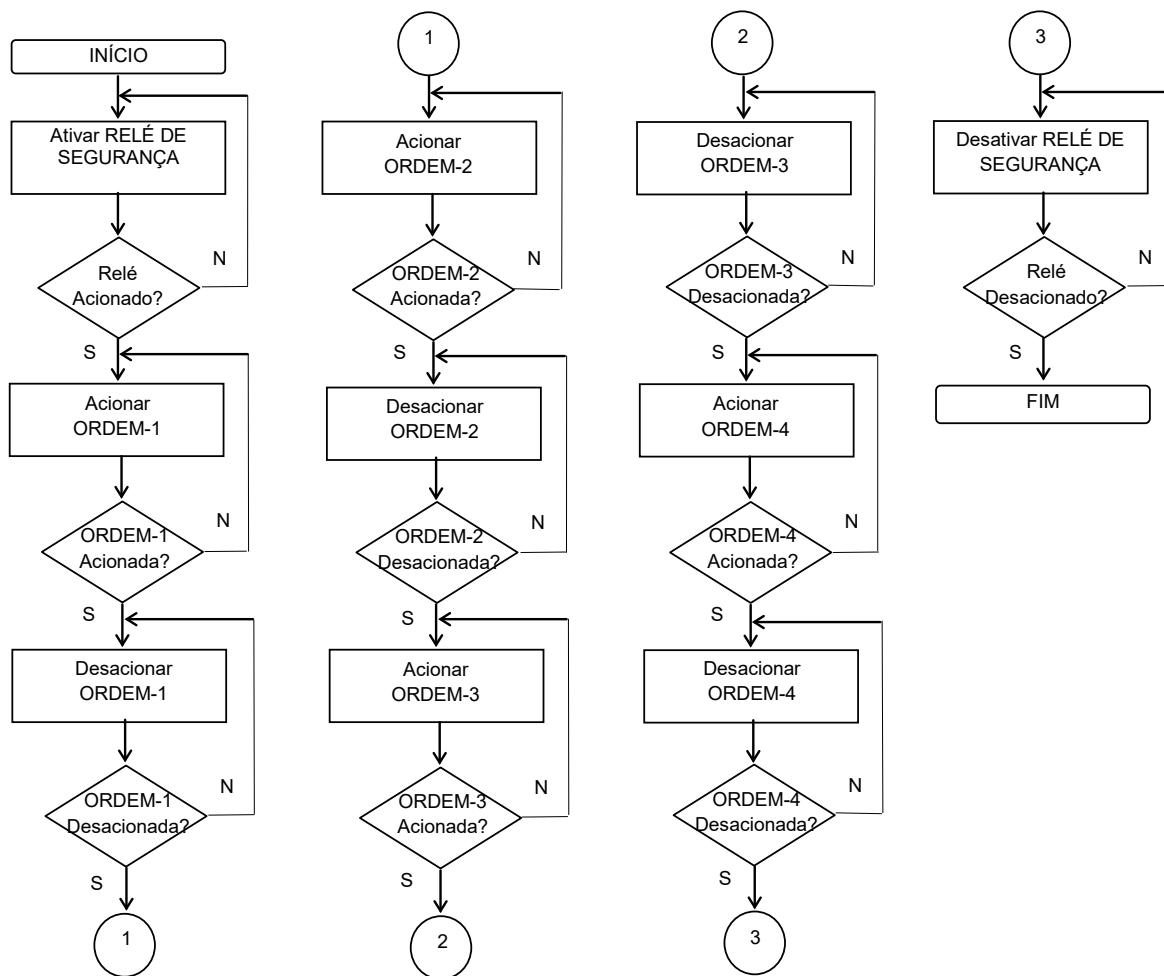


Figura 4 - Fluxograma sintético do programa de gerenciamento.

Na Figura 3, a indicação sobre a circulação de corrente nas linhas que atendem os eletropirotécnicos é realizada pelo modelo do DETECTOR DE PULSO. Essa indicação é digital e se refere a um valor fixo preestabelecido.

Os possíveis estados alcançados pelo modelo desse detector, durante a simulação, estão indicados na Figura 3 pelas seguintes posições: Inexistente e Existente. Essas informações também são enviadas para a Interface Homem-Máquina (IHM) com o objetivo de sensibilizar o operador do sistema sobre a circulação de corrente nas linhas que atendem os eletropirotécnicos.

A informação sobre o desacionamento simultâneo de todos os relés de linha positiva e negativa, pertencentes às ordens, é fornecida pelo modelo elaborado para a CONDIÇÃO PASSIVA. Os possíveis estados alcançados pelo modelo dessa condição, durante a simulação, estão indicados na Figura 3 pelas seguintes posições: Inexistente e Existente. Essas informações são enviadas para

a Interface Homem-Máquina (IHM) com o objetivo de sensibilizar o operador do sistema sobre a condição passiva dos relés de ordens.

O modelo para a ORDEM-1 apresenta o relé de linha positiva e negativa utilizados na atuação de eletropirotécnico, o qual pode estar relacionado com de sistema de ativação de tubeira móvel (Palmério, 2002), para veículos lançadores de satélites.

Os possíveis estados alcançados pelos modelos dos contatos principais e auxiliares do relé de linha positiva e negativa dessa ordem, durante a simulação, estão indicados na Figura 3 pelas seguintes posições: Desacionado (principal), Ativado (principal),  $t_{ati}$  (transitório de ativação),  $t_{seg}$  (transitório de desativação),  $s_{seg}$  (auxiliar, posição desativada), e  $s_{ati}$  (auxiliar, posição ativada).

As posições  $Hab_{L+}$  e  $Des_{L-}$  representam, respectivamente, informações pertinentes a habilitação e desabilitação que os relés de linha impõe para a ORDEM-1, em função dos seus atuais estados. Essas informações são enviadas para a Interface Homem-Máquina (IHM) com o objetivo de sensibilizar o operador do sistema sobre o atual estado do relé de linha positiva e negativa.

Os estados que podem ser alcançados pelo modelo elaborado para representar eletropirotécnico são: Inativo e Ativo, os quais são apresentados na Figura 3.

Os modelos para ORDEM-2, ORDEM-3 e ORDEM-4 são análogos ao da ORDEM-1, exceto por algumas nomenclaturas e relacionamentos que podem ser com a iniciação e separação de estágios distintos do veículo lançador de satélites.

#### 4. SIMULAÇÃO DO MODELO

A simulação computacional do modelo elaborado para avaliar proposta de automatização de sequência dedicada de operações que são aplicadas nos ensaios de qualificação, aceitação e revalidação de equipamento eletroeletrônico embarcado, por meio das Redes de Petri, apresentada na Figura 3, foi realizada por completo, diversas vezes, com a utilização do *software* denominado por Visual Object Net (Visual Object Net, 2006).

Algumas fases dessa simulação, com indicação de estado de operação do Controlador Lógico Programável (CLP) e Módulo de Segurança e Atuação (MSA), são apresentadas nesta parte do trabalho.

Cabe mencionar que nas figuras contidas nesta parte do trabalho são destacados componentes específicos para evidenciar os principais estados operacionais alcançados pelo sistema em questão, durante a simulação da evolução das Redes de Petri modelada.

O funcionamento do sistema é iniciado no momento em que o operador aciona a execução automática de sequência de operações prevista na Interface Homem-Máquina (IHM).

A consequência desse acionamento é mostrada na Figura 5 pela inserção de uma única ficha na posição que representa o início da execução de programa contido no CLP e pelas fichas presentes nas diversas posições que representam o estado de repouso do MSA e eletropirotécnicos.

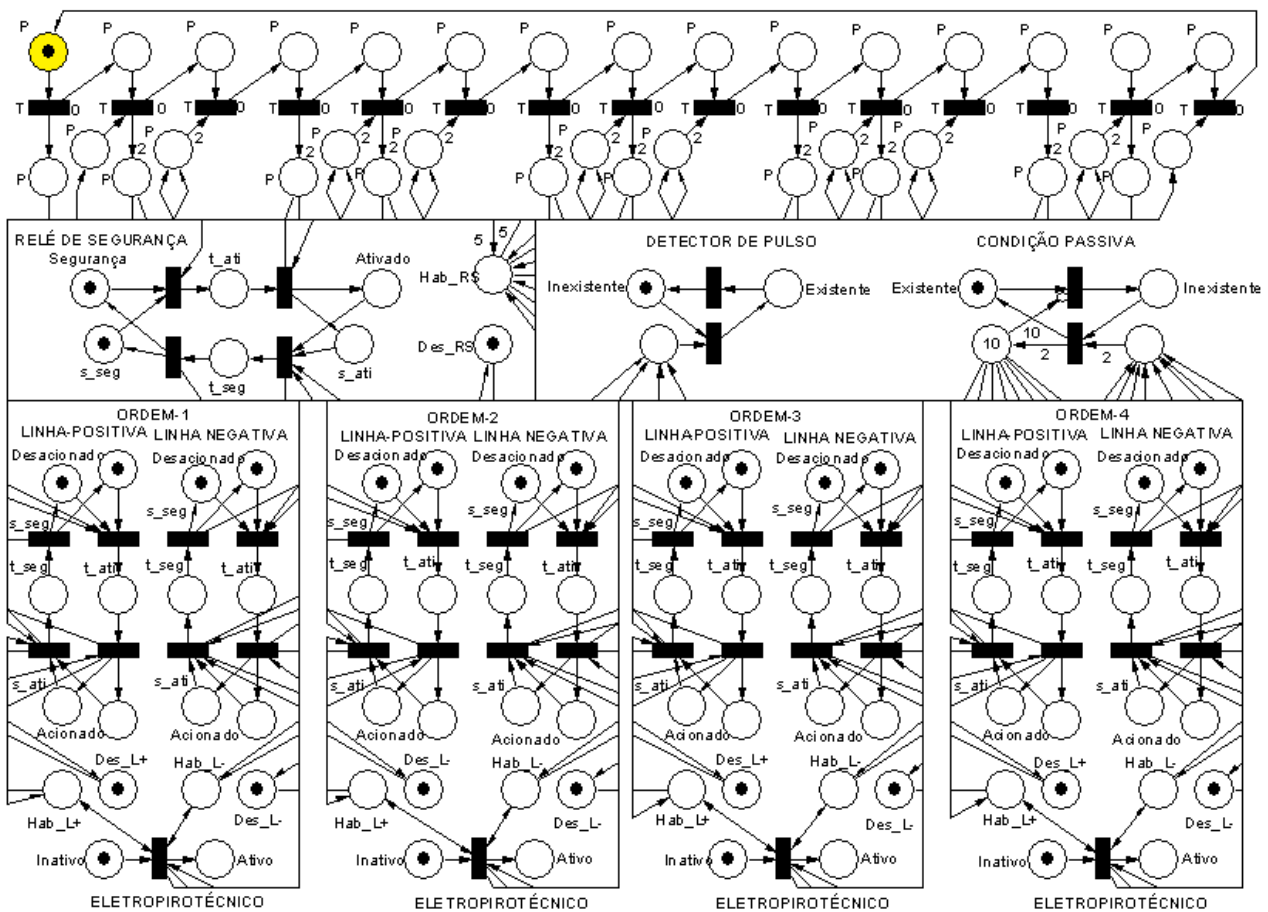


Figura 5 - Condição inicial.

Iniciada a sequência de operações que será aplicada ao MSA, considerando que não haver restrições para a operação do mesmo, deve ocorrer mudança de estado no RELÉ DE SEGURANÇA. Essa ação está representada na Figura 6 por meio das mudanças de posições ocorridas nas fichas do modelo do RELÉ DE SEGURANÇA, na condição habilitação (Hab\_RS) e desabilitação (Des\_RS) de ordens.

Relativamente ao RELÉ DE SEGURANÇA, essas fichas estavam nas posições denominadas por Segurança e s\_seg, ocorridas transições, passaram para as posições por Ativado e s\_ati.

Para a condição de habilitação, essa ficha estava na posição denominada por Des\_RS, ocorridas transições, passou para a posição Hab\_RS.

Essas mudanças de estado exigiram mais de uma transição, em função desse modelo considerar estado intermediário (t\_ati) para ativação dos contatos desse relé.

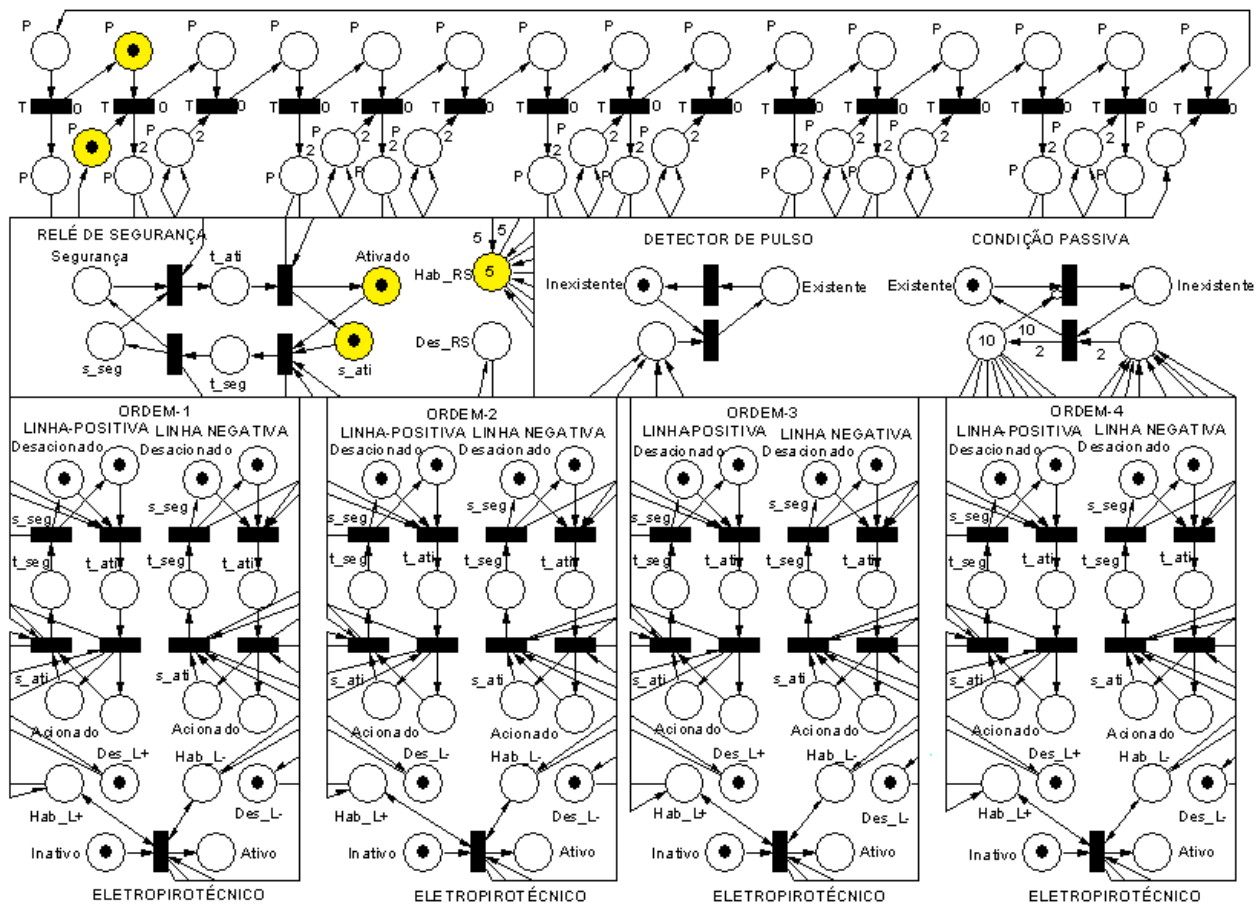


Figura 6 - Ativação do RELÉ DE SEGURANÇA.

O acionamento do relé da linha positiva e negativa, pertencentes à primeira ordem (ORDEM-1), é condição necessária para permitir a ativação do eletropirotécnico atendido por essa ordem.

Essa ação está representada na Figura 7 por meio das mudanças de posições ocorridas nas fichas dos seguintes modelos: 1) relé de linha positiva e negativa, 2) habilitação (Hab\_L+, Hab\_L-) e desabilitação (Des\_L+, Des\_L-) de ordens, 3) DETECTOR DE PULSO, 4) CONDIÇÃO PASSIVA e 5) ELETROPIROTÉCNICO.

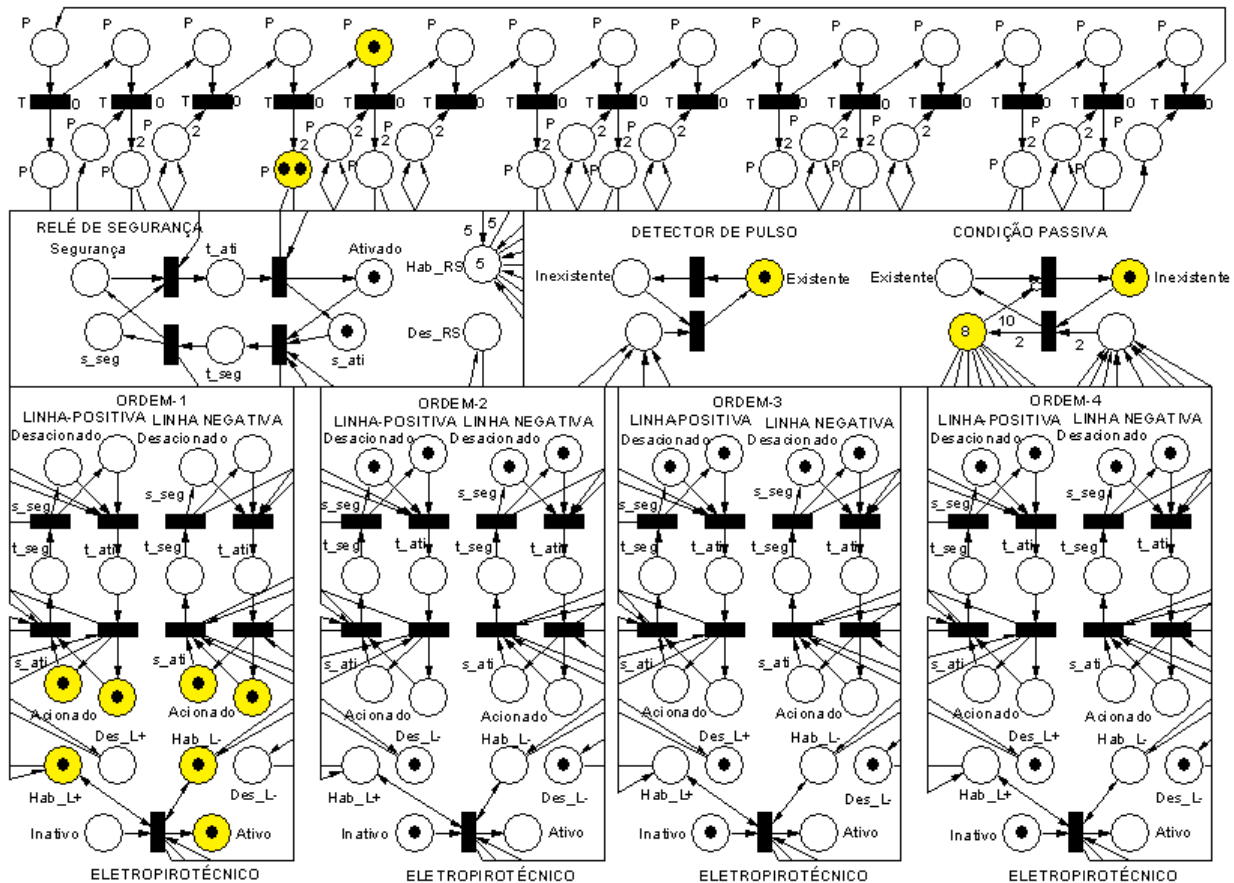


Figura 7 - Acionamento da ORDEM-1.

Relativamente ao relé de linha positiva e negativa, essas fichas estavam nas posições denominadas por Desacionado e s\_seg, ocorridas transições, passaram para as posições Acionado e s\_ati.

Para as condições de habilitação, essas fichas estavam nas posições denominadas por Des\_L+ e Des\_L-, passaram para as posições Hab\_L+ e Hab\_L-. Relativamente ao DETECTOR DE PULSO, essa ficha estava na posição denominada por Inexistente, passou para Existente.

Para a condição passiva, essa ficha estava na posição denominada por Inexistente, passou para Existente.

Para o ELETROPIROTÉCNICO, essa ficha estava na posição denominada por Inativo, passou para Ativo. Da mesma forma que ocorreu no RELÉ DE SEGURANÇA, essas mudanças de estados exigiram mais de uma transição.

O desacionamento do relé da linha positiva e negativa, pertencentes à primeira ordem (ORDEM-1), é condição prevista no programa de controle para efetuar o acionamento da segunda ordem (ORDEM-2).

Essa ação está representada na Figura 8 por meio das mudanças de posições ocorridas nas fichas dos seguintes modelos: 1) relé de linha positiva e negativa, 2) habilitação (Hab\_L+, Hab\_L-) e desabilitação (Des\_L+, Des\_L-) de ordens, 3) DETECTOR DE PULSO e 4) CONDIÇÃO PASSIVA.

Relativamente ao relé de linha positiva e negativa, essas fichas estavam nas posições denominadas por Acionado e s\_ati, ocorridas transições, passaram para as posições Desacionado e s\_seg.

Para as condições de habilitação, essas fichas estavam nas posições denominadas por Hab\_L+ e Hab\_L-, passaram para as posições Des\_L+ e Des\_L-.

Para o DETECTOR DE PULSO, essa ficha estava na posição denominada por Existente, passou para Inexistente.

Relativamente a CONDIÇÃO PASSIVA, essa ficha estava na posição denominada por Existente, passou para Inexistente. Essas mudanças de estados também exigiram mais de uma transição.

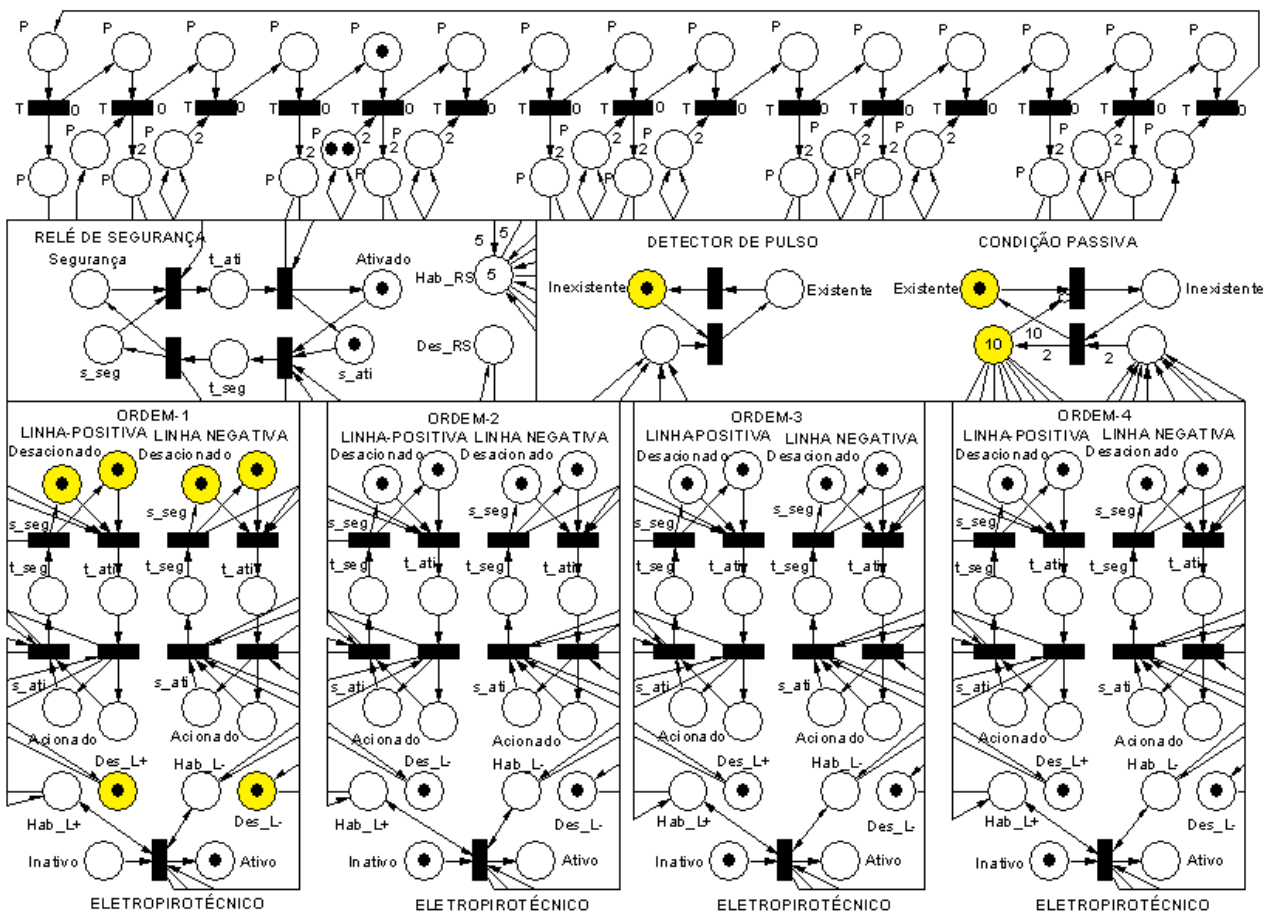


Figura 8 - Desacionamento da ORDEM-1.

O acionamento e desacionamento da segunda, terceira e quarta ordens são efetuados de modo análogo ao da primeira ordem. O resultado dessas ações é a ativação de todos os eletropirotécnicos atendidos pelo MSA.

O programa de gerenciamento, do sistema de controle, após desacionar a quarta ordem, como última ação, coloca o RELÉ SEGURANÇA no estado de segurança. Essa ação é identificada por meio das mudanças de posições ocorridas nas fichas do modelo do RELÉ DE SEGURANÇA, na condição habilitação (Hab\_RS) e desabilitação (Des\_RS) de ordens.

Para o RELÉ DE SEGURANÇA, essas fichas estavam nas posições denominadas por Ativado e s\_ati, ocorridas transições, passaram para as posições Segurança e s\_seg.

Para a condição de habilitação, essa ficha estava na posição denominada por Hab\_RS, ocorridas transições, passou para a posição Des\_RS. Essas mudanças de estados também exigiram mais de uma transição, no modelo proposto.

## 5. ANÁLISE DE PROPRIEDADES

Com o propósito de realizar as análises de propriedades na Rede de Petri (De Moraes e Castrucci, 2001) apresentada na Figura 3, foi utilizado um recurso para a restauração da condição inicial do eletropirotécnico. Cabe mencionar que esse recurso não possui significado físico específico, porém permitiu executar vários ciclos completos de avaliação com a mencionada rede.

O conflito do tipo confusão pode ser identificado, por exemplo, quando existir uma única ficha dentro de uma posição e essa possuir duas saídas para transições distintas e habilitadas, ou seja, quando isso ocorrer, o sistema de controle pode tomar decisão de trajetória inadequada e essa ação poderá promover sequência indesejada de operações.

Os conflitos do tipo confusão observados na simulação do modelo, contido na Figura 3, foram solucionados com a inserção de defasagem temporal nas habilitações das transições envolvidas com o mencionado conflito.

O conflito do tipo mortal pode ser identificado quando ocorre travamento de sistema, ou seja, a execução é paralisada interrompendo a sequência desejada de operação.

Esse tipo de conflito não foi observado nas simulações realizadas com modelo apresentado na Figura 3.

A vivacidade é a propriedade que informa se há posições ou transições que nunca são visitadas durante as execuções da rede.

Na simulação do modelo apresentado na Figura 3 todas as posições e transições foram visitadas.

A conservação é a propriedade na qual é considerado se a soma total das fichas permanece constante na execução da rede, nesse caso a mesma é dita conservativa.

Na simulação do modelo apresentado na Figura 3 as quantidades de fichas permaneceram constantes na execução da rede modelada.

## **6. RESULTADOS E CONCLUSÕES**

A forma adotada para elaborar o modelo para o sistema, utilizando as Redes de Petri, foi capaz de explicitar detalhadamente a operação do Controlador Lógico Programável (PLC), do Módulo de Segurança e Atuação (MSA) e das fases previstas no programa de gerenciamento de operação, os quais são elementos previstos na arquitetura proposta para automatização do sistema.

Essa característica permitiu a realização de análise operacional individualizada de cada parte que constitui esse sistema, o que facilita a identificação e o saneamento de possíveis desconformidades que venham acometer o mesmo.

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 a inserção de defasagem temporal nas habilitações das transições envolvidas com o mencionado conflito.

Os resultados observados nas simulações realizadas, com o modelo por Redes de Petri para o sistema proposto, indicaram que a implementação da arquitetura apresentada neste trabalho deverá ser bem sucedida, pois foram atendidas as principais propriedades das redes avaliadas.

## 7. REFERÊNCIAS

Cardoso, J.; Valette, R., 1997, Redes de Petri, Editora da UFSC, Santa Catarina, Brasil.

De Moraes, C. C. e Castrucci, P. L., 2001, Engenharia de Automação Industrial, LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

Garcia, A., 2004, “Automatização Aplicada a um Processo Dedicado à Produção de Artefatos de Borracha”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Brasil.

Miyagi, P. E., 1996, Controle Programável – Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil.

Palmério, A. F., 2002, “Introdução à Engenharia de Foguetes”, Apostila de Curso realizado no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Brasil.

Pinheiro, A. P. M., 2005, “Sistemas Eletropirotécnicos”, Apostila de Curso realizado no Instituto de Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil.

Visual Object Net, 2006, [http://www.systemtechnik.tu-ilmenau.de/~drath/visual\\_E.htm](http://www.systemtechnik.tu-ilmenau.de/~drath/visual_E.htm), página acessada em 10/04/2006.

