

SIMULAÇÃO DISCRETA

Um Sistema de Apoio à Decisão baseado em Redes de Petri para Operações de Defesa Aérea

**Donizetti Louro¹, André Luís Maia Baruffaldi², Clayton Martins Pereira³,
Sérgio Roberto Matiello Pellegrino⁴, José Maria Parente de Oliveira⁵**

ITA – Instituto de Tecnologia da Aeronáutica – Departamento de Computação Científica
Praça Marechal Eduardo Gomes 50 - 12228-900 - Sao José dos Campos – São Paulo - Brazil
{don, baruffaldi, clayton, pell, parente}@ita.br

Resumo: Este artigo explora, por intermédio de Redes de Petri, a gestão do processo de policiamento do espaço aéreo brasileiro. As Redes de Petri (RdP), como ferramenta gráfica e matemática é utilizada em modelagem, análise, simulação e controle de sistemas. Desta forma, a simulação discreta por encapsulamento de detalhes facilita a visualização do processo apoiado por seus estados e transições. Descreve, ainda, a análise das ações e das permissões para a defesa aérea. Para descrevê-lo por meio de tratamento desses eventos, podemos definir modelos hierárquicos de controle com diferentes níveis de abstração.

Palavras-Chave – simulação, controle, modelagem, redes de petri, defesa.

I. INTRODUÇÃO

Existem diversas ferramentas para o estudo de sistemas dinâmicos e, de acordo com Samilifard & Wright (2000) [7], “a modelagem com Redes de Petri¹ (RdPs) tem sido amplamente estudada e aplicada com sucesso nas áreas de sistemas dinâmicos de eventos discretos, que são caracterizados por paralelismo e sincronização”. Em nosso caso, utilizaremos em simulação discreta. Conceituam-se Redes de Petri como um modelo matemático que possibilita uma representação gráfica que proporciona uniformidade na modelagem e permite uma visualização simultânea da sua estrutura e comportamento (Barros, 1996) [10].

Assim, reitera Peterson (1981) [5], as RdPs “são importantes por permitir uma representação matemática, análise de modelos e fornecer informações úteis sobre a estrutura e o comportamento dinâmico dos sistemas modelados.” Com base nestes trabalhos, utilizamos um modelo de RdP elementar (ou ordinária), do tipo Lugar/Transição (LT), pois os mesmos são caracterizados por paralelismo e sincronização. As decisões em utilizar uma modelagem de sistemas desta natureza são fundamentadas no rigor matemático e na disponibilidade de ferramentas de análise. As Redes de Petri são formadas por:

- O ativo, denominado de transição;
- O passivo, denominado de lugar;
- O que conecta lugares e transições, denominado de arco.

Importante ressaltar os Sistemas Discretos Distribuídos que “são sistemas dinâmicos que evoluem com a ocorrência de eventos físicos em intervalos de tempo, geralmente irregulares e desconhecidos.” Louro & Pontuschka (2010)[9]. Existem vários diagramas que foram

desenvolvidos com a intenção de modelagem discreta de sistemas distribuídos. e os principais modelos utilizados para este fim são: Modelo de Cadeia Markov, o Modelo de Processo Geral Semi Markoviano, o Modelo de Teoria de Filas, o Modelo de Autômato e a Abordagem de Máquina de Estado-Finito, o Modelo de Álgebra Min-Max, o Modelo de Formalismo de Processos Finitamente Recursivos e o Modelo de Redes [Cao & Ho, 1989] [1]. Para esta discussão, nós escolhemos as redes de Petri para oferecer uma oportunidade para a integração e utilização conjunta desses diagramas, a fim de ser capaz de expressar o comportamento de alguns modelos hierárquicos de controle.

A segurança, decorrente da modernização do sistema de defesa aérea do tráfego aéreo no Brasil é possível porque há um mecanismo para selecionar e controlar os atributos de expressões tais como: meios coercitivos, aeronave hostil e medida de interdição. Este mecanismo se encontra inserido em um cenário ancorado em rígidos conceitos de segurança, necessários para refletir os procedimentos e as condições em que a *medida de interdição*² poderia ser executada.

No devir de suas aplicações a “Simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo,” Schriber [1974], Em outras palavras, “Simulação é o processo de projetar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”, Pegden, C.D., Shanon, R.E., Sadowsky R [1991] [3].

As simulações discretas permitem inferências sobre os sistemas modelados com a condição de não desenvolver sua arquitetura ou sua construção, pois apresenta conjecturas em processo de validação, o que possibilita definir e redefinir o limite do sistema na utilização de determinadas técnicas matemáticas as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação, processo ou permissão do mundo real.

²Medida de Interdição – o tiro de destruição deverá atender, obrigatoriamente, a exigências rígidas, previstas pela regulamentação contida no Decreto nº 5.144, de 16 de julho de 2004, assinado pelo Excelentíssimo Senhor Presidente da República e publicado no Diário Oficial do dia 19 de julho. São elas: a) a sua realização só poderá ocorrer estando todos os meios envolvidos sob controle operacional do Comando de Defesa Aeroespacial Brasileiro (COMDABRA), o que significa dizer que tanto os radares quanto as aeronaves de interceptação envolvidas no policiamento do espaço aéreo deverão estar sob controle operacional das autoridades de defesa aérea brasileira; b) os procedimentos descritos serão registrados em gravação sonora e/ou visual das comunicações; c) será executado apenas por pilotos e controladores de defesa aérea qualificados, segundo os padrões estabelecidos pelo Comando de Defesa Aeroespacial Brasileiro (COMDABRA); d) o procedimento irá ocorrer sobre áreas não densamente povoadas e relacionadas com rotas presumivelmente utilizadas para o tráfico de drogas.

¹ “O conceito de Redes de Petri começou com a apresentação da dissertação “Kommunikation mit Automaten (Petri, 1962) [6], apresentada em 1962 na Faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt, Alemanha Ocidental.” (Murata) [5]

II. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA

Com a finalidade de atender ao previsto no Decreto-Lei n. 1.778, de março de 1980, o COMDABRA recebeu a tarefa de realizar a vigilância do espaço aéreo brasileiro, tendo como objetivo garantir a atuação da Defesa Aérea em todo o Território Nacional, a fim de dissuadir a atividade aérea ilícita, através da vigilância constante do espaço aéreo. Para a correta e inequívoca ação do SISDABRA, diversos procedimentos foram deliberados e formalizados em documentos normalizadores do SISDABRA, denominados NOSDA. Essas normas são de conhecimento dos elos envolvidos e possuem caráter sigiloso.

O aumento de aeronaves envolvidas em atividade ilícitas no espaço aéreo brasileiro impôs o problema da limitação legal dos meios coercitivos. Essa regulamentação, bem como a possibilidade da Força Aérea Brasileira vir a ser obrigada a interditar uma aeronave envolvida com o tráfico de entorpecentes ou contrabando de armas, forçou o COMDABRA a aperfeiçoar seus métodos de controle dos procedimentos executados.

Em março de 1980, foi criado o Sistema de Defesa Aeroespacial Brasileiro – SISDABRA, através do Decreto-Lei n. 1.778, cuja finalidade é assegurar a soberania do Espaço Aéreo Brasileiro. Para isso, empregou meios do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro – SISCEAB que representa todos os meios de controle do espaço aéreo, representado pelos radares, salas de controle de tráfego aéreo (Centros de Controle de Área – ACC e os Centros de Operações Militares – CopM), sistemas de comunicação e toda a malha dos meios de telecomunicações às coordenações necessárias. Também fazem parte do SISCEAB os centros de previsões meteorológicas e de Busca e Salvamento. Para efeito de demonstração do modelo, foram empregados três procedimentos a serem cumpridos em cada medida de policiamento, denominados: Tabela de Fases, Medidas e Procedimentos, descrito a seguir:

FASE	MEDIDA	PROCEDIMENTOS
acionamento da aeronave de interceptação		Aeronave alvo ainda não foi identificada pelos órgãos de controle no tempo previsto.
		Aeronave alvo voando em rota suspeita.
		Meteorologia favorável na área de interesse
		Verificar se a distância é compatível para a interceptação
		Meteorologia favorável na base

Averiguação	Reconhecimento a Distância	Verificar uso do transponder
		Verificar meteorologia na área de interesse
		Verificar equipamento de gravação de áudio e de vídeo
	Interrogação	Verificar meteorologia na área
		Verificar autonomia do interceptador
		Verificar dados do alvo e informar ao órgão de controle apropriado
Acompanhamento	Analisar informações, baseando-se nos sistemas da ANAC	
	Verificar autonomia da aeronave de interceptação	
		Verificar compatibilidade do aeródromo de destino e alternativas para pouso do interceptador

averiguação		Verificar meteorologia na rota a ser voada
interdição	Mudança de Rota	Verificar autonomia do interceptador Verificar compatibilidade do aeródromo de destino e alternativas para pouso das aeronaves Verificar meteorologia na rota a ser voada
	Pouso Obrigatório	Verificar condições do aeródromo, infraestrutura e meteorologia Verificar apoio de solo (Polícia, ANAC, Bombeiro)
persuasão	Tiro de Aviso	Classificar a aeronave conforme previsto na legislação
		Verificar se área é desabitada
		Solicitar o código de autorização para o TAV
		Verificar se aeronave cumpre as ordens
		Caso não tenha sucesso executar TAV
interdição	Tiro de Interdição	Classificar a aeronave conforme previsto
		Verificar se área é adequada para a realização do Tiro
		Solicitar o código de autorização para o TDI à autoridade competente
		Posicionar a aeronave para TDI
		Recolher aeronave de interceptação

Fig. 1. Tabela de Fases, Medidas e Procedimentos

A seguir é apresentada uma versão resumida desta RdP para a simulação dos procedimentos do TDE, com a indicação de cada procedimento:

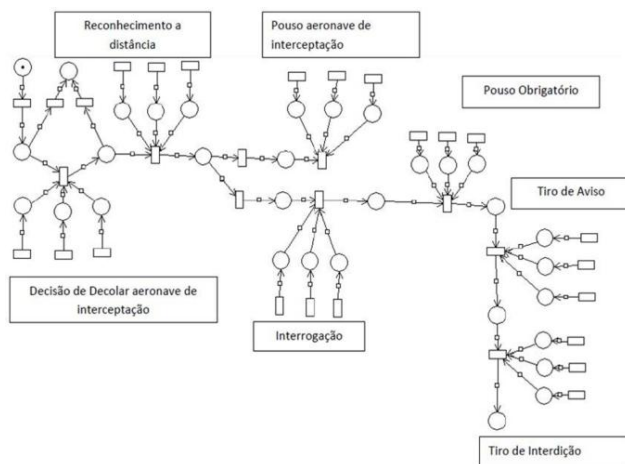


Fig. 2. Simulação dos procedimentos do TDE

A figura 2 é o resumo da RdP, construída com a finalidade de simular apenas os procedimentos de cada fase da operação do TDE, bem como gerar o autômato de validação (Máquina de Turing), sem o detalhamento das medidas e condições necessárias em cada um destes procedimentos.

A geração do algoritmo e o desenvolvimento do simulador de procedimentos do Tiro de Destrução (TDE) foram possíveis por meio da construção de uma Rede de Petri (RdP) do tipo elementar (estado/transição), a qual é apresentada a seguir:

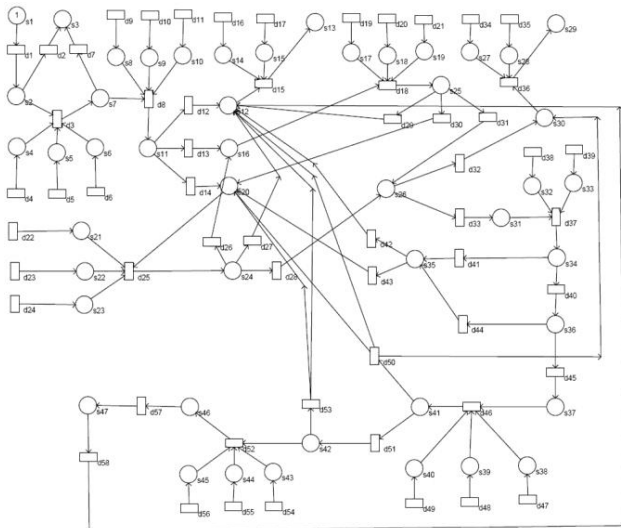


Fig. 3. Fases para a tomada de decisão [8]

A figura 3 apresenta uma RdP construída para simular um cenário de apoio à decisão para as operações do Tiro de Destruição (TDE), onde cada estado (círculo) representa uma situação corrente ou uma medida a ser tomada naquele momento ou fase da operação, e cada transição (retângulo) representa uma decisão ou condição necessária para o acionamento do estado seguinte (indicado pela respectiva seta).

A manutenção da consciência situacional é uma constante em todos os elos do SISDABRA, e fator decisivo para o sucesso e para a manutenção da segurança das operações de defesa aérea. O SISDABRA possui como elo central o Comando de Defesa Aeroespacial Brasileiro – COMDABRA, com sede em Brasília-DF. Como principais elos desse Sistema existem o Centro de Operações de Defesa Aeroespacial – CODA, os CopM e os pilotos das aeronaves de defesa aérea. [8]

III. RESULTADOS OBTIDOS

A segurança aérea vem sofrendo, há algumas décadas, transformações para se adequar às novas necessidades contemporâneas. Por outro lado, a garantia da segurança do espaço aéreo brasileiro se encontra preconizada pelo CNS/ATM³, e fundamentada na utilização de tecnologias emergentes, para sistemas digitais, satélites, entre outros, aplicadas em áreas como: comunicação, vigilância, segurança e navegação, do mesmo modo que ao gerenciamento do tráfego aéreo. Os procedimentos operacionais, autorizações e permissões, são estabelecidas para manter os níveis de segurança, sem que algumas falhas possam interferir na dinâmica do comando e controle.

Na simulação discreta, a identificação e a descrição dos processos e permissões, do ponto de vista funcional, caracterizam e são responsáveis pela dinâmica desse sistema de defesa. Assim, em simulação computacional⁴ com esta aplicação, foi representado um sistema por meio de um

³ Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management.

⁴ A simulação computacional de sistemas, ou simplesmente *simulação*, consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo (sistemas) do mundo real.” (Freitas) [2]

conjunto de processos e permissões, sendo cada um deles possuidor de determinados valores sgnicos como elementos responsáveis por todas as atividades no sistema. Afinal, para além destes dois elementos, por meio dos quais é perfeitamente possível criar um modelo discreto, outros elementos também se apresentaram importantes, com o desenvolvimento da aplicação e de técnicas de simulação.

Nas Redes de Petri temos os seguintes componentes: a transição, que é ativa e correspondente a alguma ação realizada dentro do sistema, e o lugar, que é passivo e está relacionado a alguma variável de estado do sistema. E, segundo Murata (1989) [4], “a realização das ações está associada à pré-condições ou condições das variáveis de estado do sistema, isto é, há uma relação entre lugares e transições, a qual possibilita realizar determinada ação.”

IV. SOLUÇÃO A SER IMPLEMENTADA

Devido à importância do tema e às repercussões advindas de uma ação mais enérgica do SISDABRA, tornou-se necessária a modernização de tais ferramentas, por meio de uma alternativa viável e eficiente. Para isso, o presente estudo propõe, a fim de atender a essa demanda, a implementação da metodologia proveniente da Rede de Petri.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica acerca do assunto, e foram grifados elementos definidos como: fases das medidas de policiamento, momentos de tomada de decisão e informações para apoio a essas decisões. Com base nesses dados, o resultado na Fig. 3 apresenta as fases e as respectivas medidas a serem tomadas em cada uma delas, bem como retornar a uma fase anterior, caso necessário. O tipo de modelagem e análise de sistemas que vamos desenvolver neste trabalho compara-se a simulação de eventos discretos⁵ e necessita de linguagens e ferramentas de modelagem específicas para o seu desenvolvimento.

Este trabalho propõe um modelo para avaliação de sistemas de comando e controle do espaço aéreo brasileiro, por meio de Redes de Petri. Em seguida, é apresentada uma extensão do modelo geral para a análise da tomada de decisão.

Para a RdP resumida foi construído um autômato de Máquina de Turing, o qual permitiu a validação e simulação desta RdP, possibilitando a geração do algoritmo a ser implementado em linguagem Java. Para entender o funcionamento desta Máquina de Turing, bem como os procedimentos do Tiro de Destruição (TDE), o autômato começa com o acionamento da aeronave de interceptação, o qual pode ser cancelado e a missão abortada, ou então, iniciar a decolagem desta aeronave, a qual também pode ser cancelada e a missão encerrada. Decolada a aeronave, inicia-se cada fase dos procedimentos do TDE, tais como o reconhecimento à distância, a interrogação, o pouso obrigatório, o tiro de aviso e o tiro de destruição. Este autômato é apresentado a seguir:

⁵ O que caracteriza a simulação a eventos discretos é o fato do tempo da simulação ser descontínuo. Ele anda aos saltos: suponha que um evento e_a ocorreu no instante t_a do tempo simulado e foi sucedido pelo evento e_b , o qual ocorreu no instante t_b do tempo simulado. Se não aconteceu nenhum evento de interesse entre e_a e e_b , então o tempo simulado pulou de t_a diretamente para t_b .

