

---

**OTHON MARCELO NUNES BATISTA**

**ESTUDO DE EQUIVALÊNCIA DE MODELOS MARKOVIANOS  
CONSTRUÍDOS COM OS PARADIGMAS REDES DE FILAS E  
REDES DE PETRI**

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal da Paraíba – Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Informática.

---

**ORIENTADORES: Prof.<sup>ª</sup> Maria Izabel Cavalcanti Cabral  
Prof. Jorge César Abrantes de Figueiredo**

**LINHA DE PESQUISA: REDES DE COMPUTADORES E  
SISTEMAS DISTRIBUÍDOS**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

Campina Grande  
1999

---



B333e Batista, Othon Marcelo Nunes  
Estudo de equivalência de modelos markovianos construídos com os paradigmas redes de fila e redes de petri / Othon Marcelo Nunes Batista. - Campina Grande, 1999.  
84 f.

Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Redes de Petri 2. Cadeias de Markov 3. Avaliação de Desempenho 4. Dissertação - Informática I. Cabral, Maria Izabel Cavalcanti II. Figueiredo, Jorge Cesar Abrantes de III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 004.7(043)

**ESTUDO DE EQUIVALÊNCIA DE MODELOS MARKOVIANOS  
CONSTRUÍDOS COM OS PARADIGMAS REDES DE FILAS E REDES DE  
PETRI**

**OTHON MARCELO NUNES BATISTA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28.06.1999**



**PROF<sup>a</sup> MARIA IZABEL CAVALCANTI CABRAL, D.Sc**  
**Orientadora**

**PROF. JORGE CESAR ABRANTES DE FIGUEIREDO, D.Sc**  
**Orientador**



**PROF. EDILSON FERNEDA, Dr.**  
**Examinador**



**PROF. GUIDO LEMOS DE SOUZA FILHO, Dr.**  
**Examinador**

**CAMPINA GRANDE – PB**

## RESUMO

O Sistema de AVAliação de Desempenho de Modelos de Redes Filas (SAVAD) é um software que permite solucionar modelos de redes de filas que representam sistemas discretos, particularmente sistemas de redes de computadores. O SAVAD apresenta facilidades para a solução de modelos markovianos, isto é, modelos que somente apresentam distribuições de probabilidades exponenciais. Essas facilidades estão presentes em uma ferramenta denominada ALLOS, que permite solucionar modelos através de cadeias de Markov. Esta dissertação de mestrado apresenta estudos de equivalência entre modelos que representam sistemas markovianos construídos como sistemas de redes de filas, através do SAVAD, e modelos construídos como “Generalized Stochastic Petri Nets” (GSPN). Esses estudos objetivam a integração de GSPN ao SAVAD, permitindo, a adição da análise qualitativa na solução desses modelos. A análise qualitativa realizada nesta dissertação volta-se à observação de duas propriedades importantes em modelos representados em GSPN: vivacidade e limitação. Os estudos de equivalência se baseiam no isomorfismo existente entre as cadeias de Markov obtidas por modelos representados como sistemas de redes de filas, solucionados através da ferramenta ALLOS do SAVAD, e por modelos representados em GSPN.

## SUMMARY

The queueing networks performance evaluation system (SAVAD) is a software that allows to solve queueing network models that represents discrete systems, particularly computer network systems. SAVAD presents facilities to solve markovian models, i.e., models that only presents exponential probability distributions. This facilities are available in a tool denominated ALLOS, that permits to solve models by its Markov chains. This masters dissertation presents equivalence studies between models that represent markovian systems constructed as queueing network systems, by SAVAD, and models constructed as generalized stochastic Petri nets (GSPN). These studies aim the integration of GSPN to SAVAD, allowing, the addiction of qualitative analysis to the solution of this models. The qualitative analysis realized in this dissertation is directed to the observation of two important properties in the models represented in GSPN: liveness and boundedness. The equivalence studies are based in the isomorphism existent between the Markov chains obtained by models represented as queueing network systems, solved by the tool ALLOS of SAVAD, and by models represented in GSPN.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a todas as entidades espirituais que tanto me ajudaram nas horas de desespero.

Destaque merecem os meus orientadores, Prof<sup>ª</sup>. Maria Izabel Cavalcanti Cabral e Prof. Jorge César Abrantes de Figueiredo, pela atenção e paciência dispensados.

Agradecimentos especiais pelo apoio: aos meus pais, Otoniel Caetano Batista e Francisca Solange Nunes Batista (*in memoriam*), à minha esposa, Hoslânia Marques Osório Batista, ao meu filho, Otoniel Caetano Batista Neto, à esposa de meu pai, Sônia Ronilda Sales Dutra Batista, aos meus familiares e aos meus amigos.

Agradeço também à CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual seria praticamente impossível dar início aos trabalhos.

Aos funcionários do DSC, da COPIN e da MINIBLIO, que sempre me ajudaram.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	VI
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	3
1.2. RELEVÂNCIA .....	4
1.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO .....	6
<b>CAPÍTULO 2 – SAVAD .....</b>	<b>7</b>
2.1. INTRODUÇÃO.....	7
2.2. ELEMENTOS DE MODELAGEM.....	7
2.2.1. Fregueses.....	8
2.2.2. Estações de Serviço .....	8
2.2.3. Fonte .....	9
2.2.4. Sorvedouro .....	10
2.2.5. Ponto de Multiplicação.....	10
2.2.6. Ponto de Fusão.....	10
2.2.7. Ponto de Sincronização.....	10
2.2.8. Ponto Escalonador.....	11
2.2.9. Rotas .....	12
<b>CAPÍTULO 3 – REDES DE PETRI.....</b>	<b>14</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	14
3.2. REDES DE PETRI ESTOCÁSTICAS GENERALIZADAS (GSPN) .....	19
<b>CAPÍTULO 4 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MODELAGEM DO SAVAD EM GSPN.....</b>	<b>27</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	27
4.2. FREGUESES.....	27
4.3. ESTAÇÕES DE SERVIÇO .....	27
4.4. CLASSES .....	32
4.5. FONTE .....	32
4.6. SORVEDOURO.....	32
4.7. PONTO DE FUSÃO.....	33
4.8. PONTO DE MULTIPLICAÇÃO.....	34
4.9. PONTO DE SINCRONIZAÇÃO.....	35
4.10. PONTO ESCALONADOR.....	37
4.11. FILA COM CAPACIDADE LIMITADA.....	42
<b>CAPÍTULO 5 - VALIDAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	44
5.2. EXEMPLOS .....	45
5.2.1. Sistema M/M/1/5.....	45
5.2.2. Sistema M/M/3/10.....	48
5.2.3. Modelo de uma Rede Aberta sem Realimentação .....	52
5.2.4. Modelo de uma Rede Fechada .....	54
5.2.5. Modelo de uma Rede Aberta com Ponto de Multiplicação .....	57
5.2.6. Modelo de uma Rede Aberta com Ponto de Fusão.....	60
5.2.7. Modelo de um Protocolo de Sessão com Diálogo Semi-Duplex .....	64
5.2.8. Modelo de um Protocolo de Sessão com Quarentena de Dados e Modo de Diálogo Duplex .....	67
5.2.9. Modelo de uma Rede Local Anel com Política Randômica.....	69

<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>77</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	77
6.2. TRABALHOS FUTUROS.....	80
<b>SUMMARY.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>



# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TIPOS DE ESTAÇÕES DE SERVIÇO.....	9
FIGURA 2 - FONTE.....	9
FIGURA 3 - SORVEDOURO.....	10
FIGURA 4 - PONTO DE MULTIPLICAÇÃO.....	10
FIGURA 5 - PONTO DE FUSÃO.....	10
FIGURA 6 - PONTO DE SINCRONIZAÇÃO - TRÊS POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES.....	11
FIGURA 7 - PONTO ESCALONADOR.....	12
FIGURA 10 - EXEMPLO DE REDE DE PETRI.....	16
FIGURA 11 - MARCAÇÃO ALCANÇADA APÓS O DISPARO DA TRANSIÇÃO $T_1$ .....	17
FIGURA 12 - GRAFO DE ALCANÇABILIDADE PARA O EXEMPLO DA FIGURA 10.....	18
FIGURA 13 - MODELO EM GSPN DA REDE DE FILA M/M/1/3 (MARCAÇÃO INICIAL).....	21
FIGURA 14 - MODELO EM GSPN DA REDE DE FILA M/M/1/3 (MARCAÇÃO APÓS A INICIAL).....	22
FIGURA 15 - REDE DE PETRI UTILIZADA PARA OBTEN O GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DA GSPN DA FIGURA 13.....	24
FIGURA 16 - GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DO MODELO DA REDE DE FILA M/M/1/3.....	25
FIGURA 17 - CONTRAÇÃO DO GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DO MODELO DA REDE DE FILA M/M/1/3.....	25
FIGURA 18 - CADEIA DE MARKOV DO MODELO DE REDE DE FILA M/M/1/3.....	25
FIGURA 19 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO GENERALIZADA.....	28
FIGURA 20 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO COM SERVIDOR SIMPLES E FILA DE COMPRIMENTO INFINITO.....	30
FIGURA 21 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO COM SERVIDOR SIMPLES E COMPRIMENTO MÁXIMO DE FILA IGUAL A 4.....	30
FIGURA 22 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO COM 3 SERVIDORES E FILA INFINITA.....	31
FIGURA 23 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO COM 3 SERVIDORES E COMPRIMENTO MÁXIMO DE FILA IGUAL A 7.....	31
FIGURA 24 - ESTAÇÃO DE SERVIÇO COM INFINITOS SERVIDORES.....	32
FIGURA 25 - FONTE.....	32
FIGURA 26 - PONTO DE FUSÃO.....	34
FIGURA 27 - PONTO DE MULTIPLICAÇÃO.....	35
FIGURA 28 - PONTO DE SINCRONIZAÇÃO COM DUAS ENTRADAS E DUAS SAÍDAS CORRESPONDENTES.....	36
FIGURA 29 - PONTO DE SINCRONIZAÇÃO COM DUAS ENTRADAS E UMA SAÍDA.....	36
FIGURA 30 - PONTO DE SINCRONIZAÇÃO COM UMA ENTRADA E UMA SAÍDA.....	37
FIGURA 31 - PONTO ESCALONADOR COM POLÍTICA DE ESCALONAMENTO RANDÔMICA.....	38
FIGURA 32 - PONTO ESCALONADOR COM POLÍTICA DE ESCALONAMENTO CÍCLICA.....	40
FIGURA 33 - PONTO ESCALONADOR COM POLÍTICA DE ESCALONAMENTO LIVRE.....	42
FIGURA 34 - FILA COM CAPACIDADE.....	43
FIGURA 35 - MODELO DO SISTEMA M/M/1/5 NO SAVAD.....	45
FIGURA 36 - CADEIA DE MARKOV DO SISTEMA M/M/1/5 (SAVAD).....	46
FIGURA 37 - MODELO DO SISTEMA M/M/1/5 EM GSPN.....	46
FIGURA 38 - GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DO MODELO M/M/1/5.....	47
FIGURA 39 - CADEIA DE MARKOV DO MODELO M/M/1/5 (GSPN).....	48
FIGURA 40 - MODELO DO SISTEMA M/M/3/10 NO SAVAD.....	48
FIGURA 41 - CADEIA DE MARKOV DO SISTEMA M/M/3/10 (SAVAD).....	49
FIGURA 42 - MODELO PARA O SISTEMA M/M/3/10 EM GSPN.....	50
FIGURA 43 - GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DO SISTEMA M/M/3/10.....	51
FIGURA 44 - CADEIA DE MARKOV DO SISTEMA M/M/3/10 (GSPN).....	51
FIGURA 45 - MODELO DE UMA REDE ABERTA SEM REALIMENTAÇÃO NO SAVAD.....	52
FIGURA 46 - MODELO DE UMA REDE ABERTA SEM REALIMENTAÇÃO EM GSPN.....	53
FIGURA 47 - MODELO DE UMA REDE FECHADA NO SAVAD.....	54
FIGURA 48 - MODELO DE UMA REDE FECHADA EM GSPN.....	55
FIGURA 49 - GRAFO DE ALCANÇABILIDADE DO MODELO DE UMA REDE FECHADA.....	56
FIGURA 50 - CADEIA DE MARKOV DO MODELO DE UMA REDE FECHADA (GSPN).....	56
FIGURA 51 - MODELO DE UMA REDE ABERTA COM PONTO DE MULTIPLICAÇÃO NO SAVAD.....	57
FIGURA 52 - MODELO DE UMA REDE ABERTA COM PONTO DE MULTIPLICAÇÃO EM GSPN.....	59
FIGURA 53 - MODELO DE UMA REDE ABERTA COM PONTO DE FUSÃO NO SAVAD.....	60
FIGURA 54 - MODELO DE UMA REDE ABERTA COM PONTO DE FUSÃO EM GSPN.....	62
FIGURA 55 - MODELO DE UM PROTOCOLO DE SESSÃO COM DIÁLOGO SEMI-DUPLÉX NO SAVAD.....	64

FIGURA 56 - MODELO DE UM PROTOCOLO DE SESSÃO COM DIÁLOGO SEMI-DUPLEX GSPN.....	66
FIGURA 57 - MODELO DE UM PROTOCOLO DE SESSÃO COM QUARENTENA DE DADOS NO SAVAD.....	67
FIGURA 58 - MODELO DE UM PROTOCOLO DE SESSÃO COM QUARENTENA DE DADOS E MODO DE DIÁLOGO DUPLEX EM GSPN.....	68
FIGURA 59 - MODELO DE REDE LOCAL ANEL COM POLÍTICA RANDÔMICA NO SAVAD.....	70
FIGURA 60 - MODELO DE REDE LOCAL ANEL COM POLÍTICA DE ESCALONAMENTO RANDÔMICA EM GSPN. .	71
FIGURA 61 - MODELO DE UMA REDE LOCAL ANEL COM PASSAGEM DE FICHA EM GSPN. ....	74
FIGURA 62 - POSSÍVEL DEADLOCK NO MODELO DA FIGURA 55. ....	78
FIGURA 63 - POSSÍVEL DEADLOCK NO MODELO DA FIGURA 57. ....	79
FIGURA 64 - MODELO DA FIGURA 62 EM GSPN. ....	79
FIGURA 65 - MODELO DA FIGURA 63 EM GSPN. ....	80

**Assunto: Mensagem com parecer da dissertacao de Othon**

**Data:** Fri, 25 Jun 1999 14:54:25 +0200 (MET DST)

**De:** Jorge Cesar Abrantes de Figueiredo <abrantes@daimi.au.dk>

**Para:** sampaio@dsc.ufpb.br

oi Marcus,

confirme o recebimento dessa mensagem e me diga se necessita mais alguma coisa.

Abracos.

Jorge

----- PARECER -----

**Titulo:** Estudo de Equivalencia de Modelos Markovianos Construidos com os Paradigmas de Redes de Fila e Redes de Petri

**Aluno:** Othon Marcelo Nunes Batista

O trabalho de Othon consistiu em modelar usando GSPN o conjunto de elementos que o SAVAD usa para modelar sistemas de redes de Fila.

Do ponto de vista de Redes de Petri nao existe nada de novo, excetuando-se alguns modelos em GSPN que foram desenvolvidos para elementos especificos do SAVAD. Entretanto, considero que o seu trabalho apresenta uma contribuicao muito relevante para o SAVAD e, conseqüentemente, para as pesquisas em modelagem e avaliacao de desempenho do Grupo de Redes de Computadores do DSC. Atraves desse estudo de equivalencia foi possivel efetuar a analise qualitativa de elementos do SAVAD, investigando propriedades como ausencia de deadlocks. Vale ressaltar que o SAVAD nao permite a investigacao de tais propriedades. A analise foi efetuada para todos elementos do SAVAD, inclusive dois elementos que nao estao ainda implementados.

Com o resultado da analise qualitativa dos modelos GSPN ele conseguiu, por exemplo:

- identificar inconsistencia na definicao de alguns elementos definidos no SAVAD, possibilitando assim a correcao destes elementos.
- verificar a existencia de bloqueios em alguns modelos ja' analisados pelo SAVAD.
- analisar dois elementos que ainda nao foram implementados.

Os resultados obtidos mostram a importancia da analise qualitativa e abrem novas perspectivas de pesquisa para o pessoal envolvido com modelagem e avaliacao de desempenho do Grupo de Redes de Computadores e com o desenvolvimento do SAVAD.

Portanto, sou favoravel a aprovacao da dissertacao de Othon.

Aarhus, DK 25/06/98

Jorge Cesar Abrantes de Figueiredo

## Capítulo 1 - Introdução

Um dos mecanismos adotados na avaliação de desempenho de um sistema é a criação de uma abstração que englobe suas características mais relevantes, o modelo do sistema. Um modelo é uma visão simplificada do sistema em estudo, entretanto, projetado com o propósito de capturar o máximo do comportamento real. Em diversos casos, avaliar o desempenho de um sistema baseado em um modelo traz algumas vantagens. Há ocasiões em que um modelo é a única alternativa prática para avaliar o desempenho de um sistema, por exemplo, quando o sistema ainda não foi materializado [CAMP, 1992].

Vários paradigmas foram adotados para modelar sistemas complexos, contudo poucos permitem a integração de conceitos de avaliação de desempenho com a sua própria descrição. Os paradigmas de redes de filas e de redes de Petri permitem.

Uma rede de filas é um sistema no qual é possível a existência de múltiplas filas operando assíncrona e concorrentemente, interconectadas conforme uma topologia específica [KLEI, 1975].

Sistemas de redes de filas são modelos comumente utilizados para a análise de sistemas de computação. A razão para isso é que eles podem expressar naturalmente o compartilhamento de recursos e enfileiramento, que são situações típicas em sistemas de computação.

Tradicionalmente, para avaliar o desempenho de modelos de redes de filas, utilizam-se técnicas analíticas, baseadas em algoritmos da Teoria das Filas [KLEI, 1975] e a Simulação Digital. BoNes [BONE, 1996], GPSS [STRA, 1984] e Arena [KELT, 1998], são exemplos de ferramentas de simulação, comumente utilizadas.

Nos últimos anos, as pesquisas em modelagem e avaliação de desempenho do Grupo de Redes de Computadores (GRC) na Universidade Federal da Paraíba (UFPb) se voltaram para o desenvolvimento de ferramentas inteligentes para a solução de modelos de redes de computadores e, de forma mais abrangente, modelos de redes de filas que representassem sistemas discretos com contenção de recursos. Com esse

propósito, foi construído o protótipo do SAVAD - Sistema de AVAliação de Desempenho de modelos de redes de filas [SOU1, 1993].

O SAVAD explora o paradigma de redes de filas permitindo, a partir de um modelo, proposto pelo usuário, identificar o tipo do modelo, procurar e ativar a solução mais adequada para o mesmo, seja essa exata ou aproximada, e fornecer ao usuário as medidas de desempenho por ele solicitadas [SOU1, 1993]. Na construção do SAVAD foram empregadas técnicas de inteligência artificial para o reconhecimento dos modelos de redes de filas submetidos e para a escolha mais adequada de suas soluções, analítica ou numérica [SOU2, 1993]. Por esse motivo, os usuários do SAVAD não necessitam conhecer com profundidade as técnicas de modelagem e avaliação de desempenho de sistemas de redes de filas.

O SAVAD apresenta facilidades adicionais na solução de modelos markovianos, isto é, modelos que utilizam a função de distribuição de probabilidades exponencial. Esses modelos podem ser solucionados analiticamente através de suas cadeias de Markov utilizando ALLOS, ferramenta integrante do SAVAD [OLIV, 1995].

Para modelar sistemas de redes de filas, o SAVAD dispõe de um conjunto de elementos que tem representação gráfica e semântica próprias, quais são: fregueses, estações de serviço, fonte, sorvedouro, ponto de multiplicação, ponto de fusão, ponto de sincronização, ponto escalonador, classe e rota [SOU1, 1993]. O SAVAD foi implementado na linguagem C++, com algumas rotinas em Prolog, no sistema operacional MS-DOS.

Por sua vez, redes de Petri são uma ferramenta para descrever e analisar sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não-determinísticos e/ou estocásticos [MURA, 1989].

As redes de Petri podem ser facilmente aplicáveis a uma diversidade de áreas, por exemplo: computação distribuída, sistemas operacionais, compiladores e projetos de circuitos. O processo de modelar utilizando redes de Petri é descritivo e analítico, pois pode-se facilmente descrever um sistema e analisar a presença de propriedades do modelo, tais como, vivacidade e limitação [PETE, 1981].

Na definição original de redes de Petri, nenhuma especificação de tempo é incluída [MURA,1989]. As redes de Petri estocásticas e temporais foram introduzidas progressivamente no final dos anos 70 e início dos anos 80 como extensões das redes de Petri lugar-transição. O propósito foi adicionar à já bem sucedida análise estrutural e qualitativa a possibilidade de avaliar o desempenho de sistemas com sincronismo [JEAN, 1993].

Algumas extensões de redes de Petri permitem a modelagem e avaliação de desempenho de sistemas markovianos, por exemplo: “Stochastic Petri Nets” - redes de Petri estocásticas (SPN) [MARS, 1989], “Stochastic Activity Networks” - redes de atividade estocástica (SAN) [MEYE, 1985], “Generalized Stochastic Petri Nets” - redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN) [MARS, 1995], “Queueing Petri Nets” - redes de Petri com filas (QPN) [BAUS, 1995].

A análise de sistemas é freqüentemente feita observando-se aspectos qualitativos e quantitativos de um modelo. Vários formalismos foram desenvolvidos como uma tentativa de combinar esses aspectos em uma descrição. A ênfase atual está em SPN [MARS, 1989] e em GSPN [MARS, 1995].

### ***1.1. Objetivos***

O objetivo deste trabalho é realizar estudos de equivalência entre modelos que representam sistemas markovianos construídos como sistemas de redes de filas e como GSPN. Esses estudos servem de base para uma futura integração de GSPN ao SAVAD, permitindo, a adição da análise qualitativa na solução desses modelos. A análise qualitativa realizada nesta dissertação volta-se à observação de duas propriedades importantes em modelos representados em GSPN: vivacidade e limitação.

Os estudos de equivalência se baseiam no isomorfismo existente entre as cadeias de Markov obtidas por modelos representados com sistemas de redes de filas, solucionados através da ferramenta ALLOS do SAVAD e por modelos representados em GSPN [MARS, 1989].

Para solucionar os modelos em GSPN desta dissertação, foi utilizada a ferramenta DNAnet, desenvolvida em 1995, no Department of Network Architecture, da University of Cape Town [KNOT, 1995].

### *1.2. Relevância*

Estudos da aplicação conjunta de paradigmas de modelagem são escassos. Uma contribuição é apresentada em [CAMP, 1992], que mostra como modelos de redes de filas com sincronização podem ser representados com o formalismo de redes de Petri. Entretanto, esses modelos não se inserem no contexto da presente dissertação, pois não visam os elementos de modelagem do SAVAD, ou mesmo de um sistema similar.

A integração de GSPN ao SAVAD permitirá que os modelos submetidos ao SAVAD possam ser analisados tanto quantitativa quanto qualitativamente, além do que, propiciará ao usuário a opção de escolher se seu modelo deverá ser solucionado quantitativamente através de GSPN ou como um modelo de redes de filas, através de ALLOS.

Conforme já mencionado, a análise qualitativa realizada nesta dissertação direciona-se à observação de duas propriedades importantes em modelos representados em GSPN: vivacidade e limitação.

O conceito de vivacidade está diretamente relacionado com a ausência de bloqueios (deadlocks), sendo bastante importante no contexto de qualquer paradigma de modelagem. Ressalta-se que as redes de Petri já têm mecanismos de análise de vivacidade bem consolidados.

Em modelos de redes de filas há lugares onde os fregueses aguardam por um serviço, as filas. Nos sistemas reais, esses lugares têm capacidade máxima limitada. Por exemplo, em sistemas de computação, um buffer de disco é uma fila e tem uma capacidade máxima de armazenamento. Caso essa capacidade seja excedida, há um estouro (overflow) no buffer, e dados são perdidos. Dessa forma, o estudo de limitação aplica-se naturalmente aos modelos com entidades que representam filas. A utilização dessa propriedade possibilitará ao SAVAD descobrir se um modelo pode ser

solucionado por ALLOS, uma vez que esse modelo deve apresentar um número finito de estados em sua cadeia de Markov.

Finalmente, os estudos apresentados nessa dissertação podem ser aplicados a qualquer ferramenta de modelagem que utiliza o paradigma de redes de filas e apresenta os elementos de modelagem básicos encontrados no SAVAD, tais como, fonte, sorvedouro, estação de serviço, ponto de multiplicação e ponto de fusão.

### *1.3 Considerações Gerais*

A escolha do SAVAD como ambiente de modelagem para os estudos realizados nesta dissertação deve-se, essencialmente, a dois fatores: o primeiro, refere-se às facilidades que ele oferece aos seus usuários na construção de modelos, disponibilizando elementos de modelagem que permitem construir modelos de redes de filas facilmente. Seus elementos: fregueses, estações de serviço, fonte, sorvedouro, ponto de multiplicação e ponto de fusão, geralmente são encontrados em outros ambientes de modelagem. Os elementos: ponto de sincronização e ponto escalonador, são elementos de mais alto nível, particularidades do SAVAD, voltados principalmente, para modelar sistemas de redes de computadores. O segundo fator, refere-se às ferramentas que o SAVAD oferece para solucionar os modelos a ele submetidos. Dentre as ferramentas do SAVAD, encontra-se ALLOS, que permite solucionar modelos de redes de filas com distribuições exponenciais através de suas cadeias de Markov.

A extensão GSPN foi escolhida para a realização da equivalência na presente dissertação porque aparece como a mais adequada para criar os modelos em redes de Petri que apresentam distribuições de tempo exponenciais, pois dispõe de funcionalidades que possibilitam solucionar esses modelos através de suas cadeias de Markov, além de também propiciar a análise qualitativa dos seus modelos.

A ferramenta DNAnet utilizada para solucionar os modelos em GSPN foi escolhida por três razões: disponibilidade (é freeware); é executada em plataforma Windows; e, fornece o grafo de cobertura (alcançabilidade) dos modelos nela desenhados. Esta última é a principal razão da escolha, uma vez que o grafo de cobertura (alcançabilidade) permite obter as cadeias de Markov dos modelos em GSPN.



### ***1.4. Organização***

O restante desta dissertação está organizado em cinco capítulos, da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta uma sucinta introdução ao SAVAD, descrevendo os seus elementos de modelagem, com suas respectivas sintaxe e semântica.
- O capítulo 3 Introduce o paradigma de redes de Petri, apresentando suas definições básicas, a construção do grafo de alcançabilidade, exemplificação de duas propriedades (vivacidade e limitação), a extensão utilizada nesta dissertação, redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN), e, um exemplo do isomorfismo entre o grafo de alcançabilidade de um modelo em GSPN e a sua cadeia de Markov.
- O capítulo 4 mostra a representação de cada elemento de modelagem do SAVAD em GSPN.
- O Capítulo 5 mostra a validação das representações dos elementos do SAVAD em GSPN, conforme apresentadas no capítulo 4.
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões e são feitas sugestões visando a continuação do presente trabalho.

## Capítulo 2 – SAVAD

### *2.1. Introdução*

O SAVAD é um sistema de avaliação de desempenho de redes de filas que a partir de um modelo proposto pelo usuário, escolhe e aplica o método mais adequado para solucioná-lo, fornecendo medidas de desempenho relevantes. Para isso, o SAVAD utiliza técnicas analíticas, baseadas em algoritmos da teoria das filas, e técnicas de simulação digital [SOU1, 1993].

O SAVAD oferece as seguintes facilidades:

- interface amigável, inteligente e integrada para a especificação do modelo de redes de filas;
- conjunto de elementos de modelagem poderoso e flexível, que facilita a especificação de um modelo de forma simples e abrangente;
- resolução do modelo pela técnica que melhor se aplica ao caso, seja analítica ou por simulação digital;
- medidas de desempenho relevantes para os modelos.

Na sua implementação, foi utilizada a linguagem de programação C++, aproveitando as potencialidades do paradigma de orientação a objetos. O sistema operacional para qual o sistema foi desenvolvido é MS-DOS.

Maiores detalhes do SAVAD são exibidos em [CABR, 1989], [SOU1, 1993], [SOU2, 1993] e [OLIV, 1995].

### *2.2. Elementos de Modelagem*

Para a modelagem de sistemas de redes de filas são utilizados elementos que representam o comportamento do problema a ser analisado.

Os elementos de modelagem do SAVAD são os seguintes:

### 2.2.1. Fregueses

Os fregueses são as entidades que circulam em uma rede de filas com a finalidade de realizar serviços. Cada freguês tem um atributo único que identifica a sua ordem de chegada na rede. Este atributo é utilizado pela política de escalonamento das filas para escolher o freguês que deve ser atendido.

Associado a um freguês existe uma classe. Os fregueses da mesma classe possuem os mesmos atributos. O caminho percorrido por um freguês é a sua rota.

Os sistemas de redes de filas podem ser: abertos, fechados ou mistos.

### 2.2.2. Estações de Serviço

As estações de serviço representam os recursos de um modelo de redes de filas. Uma estação de serviço pode ter um, múltiplos ou infinitos servidores. Um freguês é atendido por vez em um servidor.

Os tempos de atendimento dos fregueses em uma estação de serviço são obtidos conforme uma distribuição de probabilidades, que pode ser:

- exponencial;
- uniforme;
- normal;
- determinística;
- geral (definida pelo usuário).

Se um servidor estiver livre, então o freguês é atendido, caso contrário, entrará em uma fila e será atendido após aguardar na fila de acordo com uma dessas políticas de escalonamento:

- o primeiro a chegar é atendido primeiro (FCFS);
- o último a chegar é atendido primeiro (LCFS);

- por prioridade;
- randômica;
- por tempo.

Quanto ao número de servidores, uma estação de serviço pode ser: simples, múltipla ou infinita, conforme esta estação contenha um único servidor, múltiplos servidores ou infinitos servidores, respectivamente (Figura 1).

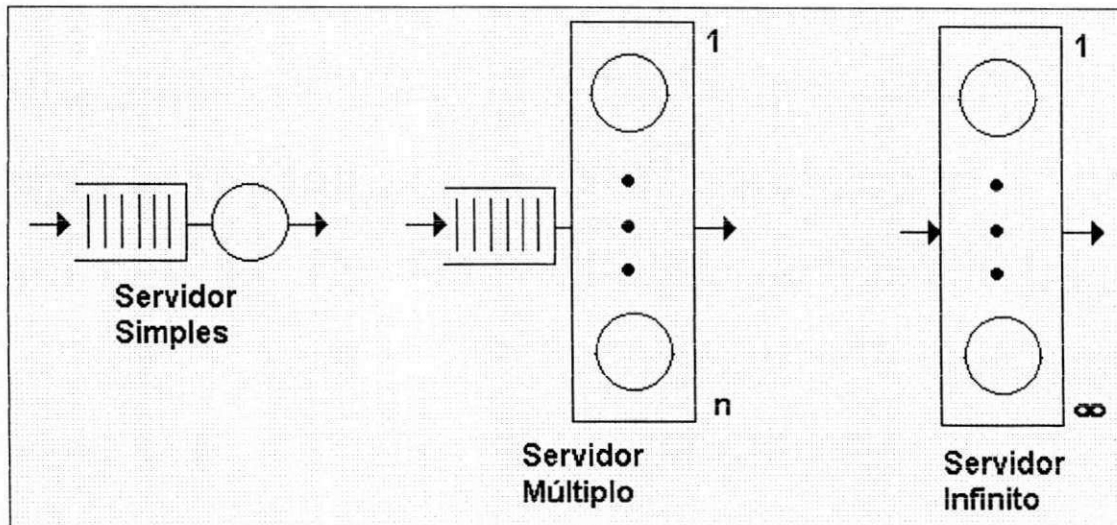


Figura 1 - Tipos de estações de serviço.

### 2.2.3. Fonte

As fontes são os elementos que geram fregueses em modelos de redes abertas (Figura 2). Os fregueses são gerados pelas fontes de acordo com uma distribuição de probabilidades similar às mencionadas para as estações de serviço.

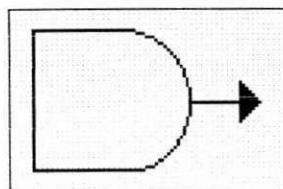


Figura 2 – Fonte.

### 2.2.4. Sorvedouro

Os sorvedouros são elementos que eliminam fregueses em modelos de redes abertas (Figura 3).

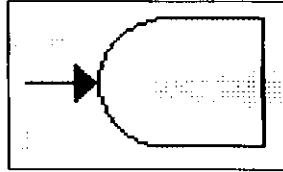


Figura 3 – Sorvedouro.

### 2.2.5. Ponto de Multiplicação

Responsável por multiplicar um freguês, um ponto de multiplicação pode possuir  $n$  saídas ( $n \in \mathbb{N}^*$ ), porém contém apenas 1 entrada (Figura 4).

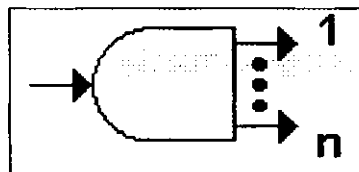


Figura 4 - Ponto de multiplicação.

### 2.2.6. Ponto de Fusão

Responsável por fundir dois ou mais fregueses em um, um ponto de fusão pode ter  $n$  entradas ( $n \in \mathbb{N}^*$ ), mas apenas uma saída (Figura 5).

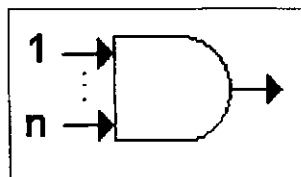


Figura 5 - Ponto de fusão.

### 2.2.7. Ponto de Sincronização

Um ponto de sincronização bloqueia fregueses até que uma condição seja satisfeita. Pode possuir as seguintes representações:

- duas entradas e duas saídas correspondentes (Figura 6);
- duas entradas e uma saída associada a uma das entradas (Figura 6);

- uma entrada e uma saída correspondente (Figura 6).

No primeiro caso, a liberação de fregueses ocorrerá quando a quantidade de fregueses nas filas de entrada atinja os limites especificados pelos parâmetros  $m$  e  $n$  ( $m$  e  $n \in \mathbb{N}^*$ ), simultaneamente.

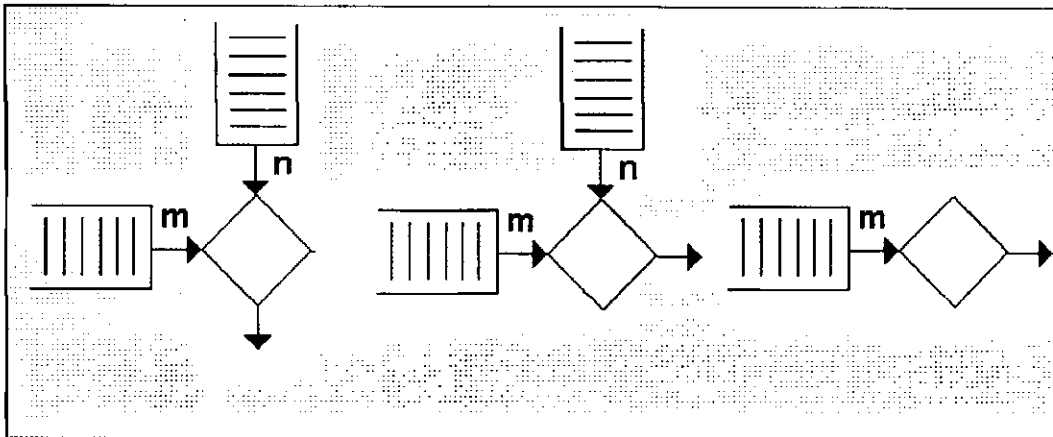


Figura 6 - Ponto de sincronização – três possíveis configurações.

No segundo caso, a liberação ocorre apenas a partir de uma das filas de entrada, desde que a quantidade de fregueses nas duas filas de entrada atinja os limites especificados pelos parâmetros  $m$  e  $n$  ( $m$  e  $n \in \mathbb{N}^*$ ), simultaneamente. A quantidade de fregueses a ser liberada é  $m$  ou  $n$ , dependendo do que for especificado pelo modelo.

No último caso, a liberação depende do número de fregueses na fila de entrada atingir o limite especificado pelo parâmetro  $m$  ( $m \in \mathbb{N}^*$ ).

Podem ocorrer as seguintes situações, de acordo com os limites especificados nas filas de entrada:

- liberação de  $k$  fregueses ( $k \in \mathbb{N}^*$ );
- liberação de até  $k$  fregueses ( $k \in \mathbb{N}^*$ );
- passagem livre de fregueses.

### 2.2.8. Ponto Escalonador

O ponto escalonador permite o escalonamento de fregueses de acordo com uma dessas disciplinas: cíclica, randômica ou livre.

Quando a política de escalonamento é cíclica, as filas são escalonadas de forma circular em uma ordem pré-definida pelo usuário. Nesse caso, a liberação de fregueses na fila escolhida pode ser:

- somente 1 freguês (não exaustiva);
- até  $n$  fregueses ( $n \in \mathbb{N}^*$ ; limitada);
- todos os fregueses (exaustiva).

Na política randômica, as filas são escalonadas de forma randômica, podendo liberar apenas um freguês por vez.

No caso da política de escalonamento livre, qualquer uma das filas que tiver pelo menos um freguês pode tentar liberá-lo. Se mais de uma fila tentar liberar um freguês ao mesmo tempo, ocorre uma colisão e estas filas ficam bloqueadas por um período de tempo determinado por uma função de distribuição de probabilidades especificada pelo usuário.

A figura 7 mostra a representação para um ponto escalonador.

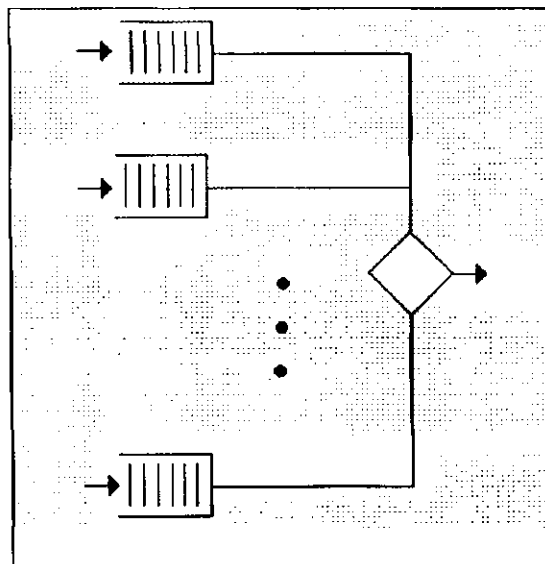


Figura 7 - Ponto escalonador.

### 2.2.9. Rotas

As rotas estabelecem os caminhos existentes na rede por onde os fregueses circulam. Cada rota tem uma classe de fregueses associada, para que certos tipos de fregueses sejam tratados distintamente.

Elas podem ser abertas ou fechadas. As rotas abertas contém elementos que geram (fontes ou pontos de multiplicação) e eliminam (sorvedouros ou pontos de fusão) fregueses do sistema. As rotas fechadas possuem um número limitado de fregueses circulando. Além disso, não podem possuir realimentação.

No SAVAD, o roteamento é fixo, uma rota é especificada pela definição da sequência dos seus elementos constituintes, na ordem desejada.



## Capítulo 3 – Redes de Petri

### 3.1. Introdução

Redes de Petri são uma ferramenta para descrever e analisar sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não-determinísticos e/ou estocásticos [MURA, 1989].

Há diversas definições de redes de Petri [PETE, 1981], [REIS, 1985], [MURA, 1989] e [MARS, 1995]. Neste capítulo está apresentada formal e graficamente a rede de Petri utilizada na presente dissertação, bem como o método utilizado para a obtenção das cadeias de Markov resultante de modelos em GSPN e a exemplificação da análise das duas propriedades utilizadas nos modelos desta dissertação: vivacidade e limitação.

Uma rede de Petri é definida como sendo um grafo dirigido bipartido  $PN = (P, T, A, E, H, Z, M_0)$ , no qual:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}^*$ , é o conjunto finito e não-vazio de lugares da rede.
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ,  $m \in \mathbb{N}^*$ , é o conjunto finito e não-vazio de transições da rede.
- $A \subseteq \{P \times T\} \cup \{T \times P\}$  é o conjunto finito e não-vazio de arcos dirigidos.
- $E : A \rightarrow \mathbb{N}^*$  é a função de peso nos arcos.
- $H \subset P \times T$  é um conjunto de arcos inibidores.
- $Z : H \rightarrow \mathbb{N}^*$  é a função de peso nos arcos inibidores.
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$  é a marcação inicial da rede de Petri.

Cada elemento do conjunto  $P$  é representado graficamente por um círculo. Os elementos do conjunto  $T$  são representados graficamente por pequenos retângulos. Cada elemento do conjunto  $A$  é representado graficamente por uma reta com uma seta em uma das extremidades. A função de peso nos arcos é representada graficamente como um número inteiro colocado próximo a um arco. Convencionou-se que quando o peso de um arco é 1, não é preciso expressá-lo no gráfico. Um arco inibidor conecta um

lugar a uma transição e é representado por uma linha com um pequeno círculo no final (ao invés da seta de um arco). O peso de um arco inibidor é descrito graficamente através de um número inteiro colocado próximo a um arco inibidor. Os arcos inibidores com peso igual a 1, por convenção, não contém este número ao seu lado quando representados graficamente.  $M_0$  pode ser visto como um vetor no qual cada componente  $i$  representa o número de fichas<sup>1</sup> no lugar  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ . A figura 10 exibe um exemplo de rede de Petri de acordo com a seguinte descrição:

- $PN = (P, T, A, E, H, M_0)$
- $P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$
- $T = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7)$
- $A = ((p_1, t_1), (t_1, p_2), (p_2, t_2), (p_2, t_3), (t_2, p_3), (t_3, p_4), (p_3, t_4), (p_4, t_5), (t_4, p_6), (t_5, p_5), (p_5, t_7), (t_5, p_6), (p_6, t_6), (t_6, p_1))$
- $E = (((p_1, t_1), 1), ((t_1, p_2), 1), ((p_2, t_2), 1), ((p_2, t_3), 1), ((t_2, p_3), 1), ((t_3, p_4), 1), ((p_3, t_4), 1), ((p_4, t_5), 1), ((t_4, p_6), 1), ((t_5, p_5), 1), ((p_5, t_7), 1), ((t_5, p_6), 1), ((p_6, t_6), 1), ((t_6, p_1), 1))$
- $H = ((p_5, t_3))$
- $Z = (((p_5, t_3), 1))$
- $M_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$

---

<sup>1</sup> As fichas são representadas graficamente como pontos pretos dentro dos lugares. Quando a quantidade de fichas é muito grande e impossibilita essa representação, o número de fichas é apresentado dentro do lugar.

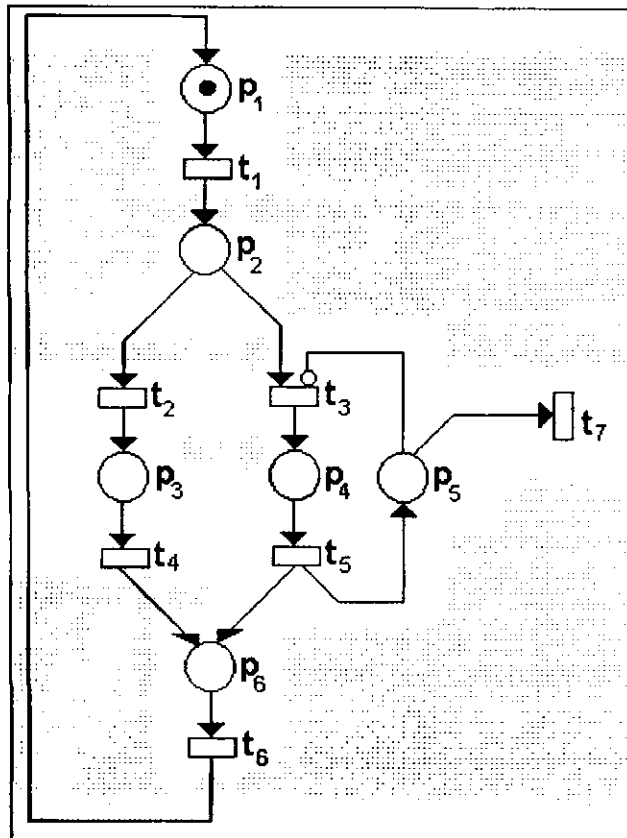


Figura 10 – Exemplo de rede de Petri.

A evolução dinâmica de um sistema modelado em rede de Petri é observada através das mudanças de marcações. Para mudar de marcação, as redes de Petri obedecem à regra de disparo, que é descrita da seguinte forma:

1. Uma transição  $t$  está habilitada quando cada um dos seus lugares de entrada contém pelo menos as quantidades de fichas correspondentes aos pesos dos respectivos arcos que ligam os lugares à transição, e quando os lugares de entrada conectados com a transição através de arcos inibidores contém menos fichas que os respectivos pesos dos arcos inibidores;
2. Somente as transições habilitadas podem disparar;
3. Quando uma transição habilitada dispara<sup>2</sup>, as quantidades de fichas correspondentes aos pesos dos arcos que ligam os lugares de entrada à transição são removidas dos lugares de entrada e as quantidades de fichas correspondentes aos pesos nos arcos que ligam a transição aos lugares de saída são adicionadas.

Por exemplo, na rede de Petri da figura 10, apenas a transição  $t_1$  está habilitada, pois  $p_1$  (único lugar de entrada de  $t_1$ ) contém pelo menos uma ficha (peso do arco ligando o lugar  $p_1$  à transição  $t_1$ ). Quando ela disparar, uma ficha é removida do

lugar  $p_1$  (peso do arco ligando o lugar  $p_1$  à transição  $t_1$ ) e uma ficha é adicionada ao lugar  $p_2$  (peso do arco ligando a transição  $t_1$  ao lugar  $p_2$ ). Esse disparo leva a rede de Petri à marcação  $M_1 = (0, 1, 0, 0, 0, 0)$ , exibida na figura 11.

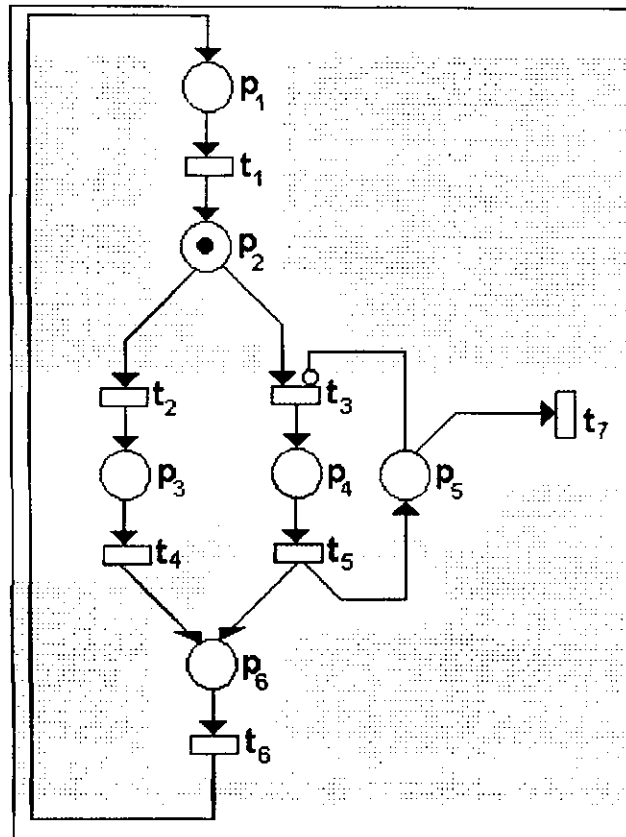


Figura 11 – Marcação alcançada após o disparo da transição  $t_1$ .

Para analisar qualitativamente uma rede de Petri, pode ser utilizado o grafo de alcançabilidade. Este método de análise de redes de Petri consiste da representação de todas as marcações que podem ser obtidas a partir da marcação inicial em uma estrutura de dados do tipo grafo.

O grafo de alcançabilidade é descrito como um grafo dirigido e com descrições,  $G = (V, J)$ , no qual:

- $V$  é o conjunto de nós com descrições.
- $J$  é o conjunto de arcos com descrições.

<sup>2</sup> No caso de mais de uma transição habilitada em um mesmo instante, a escolha de qual deve disparar depende do sistema modelado. Isso ocorre porque o disparo de transições é uma operação atômica.

Cada nó do grafo está descrito com uma marcação da rede de Petri. Cada arco representa uma mudança de marcação e está descrito com o nome da transição que gerou esta mudança.

Por exemplo, a figura 12 mostra o grafo de alcançabilidade da rede de Petri da figura 10.

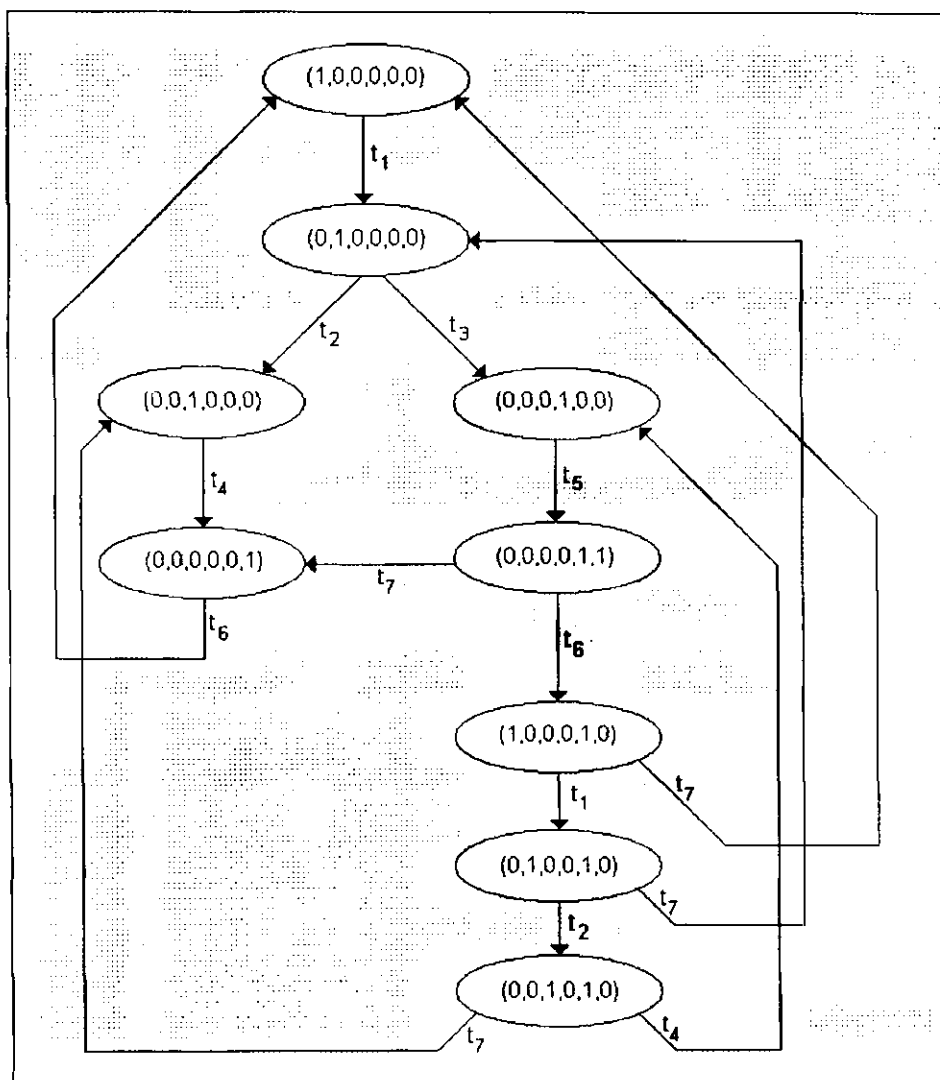


Figura 12 - Grafo de alcançabilidade para o exemplo da figura 10.

Quando a quantidade de fichas em um ou mais lugares cresce infinitamente à medida que mudam as marcações (rede de Petri ilimitada), o grafo de alcançabilidade tem o número de nós infinito, o que inviabiliza essa representação. Nesses casos, o grafo de alcançabilidade dá lugar ao grafo de cobertura, que tem o mesmo formato do grafo de alcançabilidade. A diferença está na introdução do símbolo  $\omega$  no grafo para todos os lugares nos quais o número de fichas se tornar infinito (lugar ilimitado). Com isso,

verificar se o número de fichas em certos lugares na rede cresce indefinidamente é bastante simples, pois basta observar no grafo de cobertura se o símbolo  $\omega$  aparece no vetor de marcações. Também é possível saber se uma transição nunca dispara, estando portanto morta, através da inexistência de um arco no grafo que contenha o nome da transição. Problemas relacionados com a alcançabilidade e vivacidade não podem ser verificadas com este método de análise devido à perda de informações resultante da introdução do símbolo  $\omega$ .

As redes de Petri dão suporte para a análise de diversas propriedades e problemas associados com sistemas concorrentes. Por exemplo, na figura 12, pode-se facilmente observar as seguintes propriedades pertinentes à rede de Petri da figura 10:

- A rede é viva, o que significa que todas as transições são vivas, ou seja, qualquer que seja a marcação alcançada, é possível disparar qualquer transição, diretamente ou a partir de uma sequência de disparo. O sistema que ele representa não pára em hipótese alguma.
- A rede é segura e, portanto, limitada. O fato de a rede ser segura indica que o número de fichas em todos os lugares da rede e em qualquer marcação obtida a partir da marcação inicial é no máximo 1. Uma rede de Petri é limitada quando o número de fichas em todos os lugares não excede um número inteiro  $k$  para qualquer marcação obtida a partir da marcação inicial. Como a rede é segura, obviamente ela é limitada. Se os lugares desse modelo em rede de Petri representassem filas (buffers), a limitação indicaria que nunca haveria estouro de fila (overflow) em qualquer lugar do modelo.

### ***3.2. Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN)***

Uma GSPN é uma nove - tupla:  $GSPN = (P, T, P, A, E, H, Z, M_0, W)$ , na qual:

- $(P, T, A, E, H, Z, M_0)$  é uma rede de Petri,
- $P$  é uma atribuição de prioridades às transições, a qual associa a prioridade mais baixa (zero) com as transições temporais e prioridades mais altas (maior ou igual a 1) com as transições imediatas,
- e  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  é a matriz na qual cada item  $w_i$  é:

- parâmetro da função densidade de probabilidades (fdp) exponencial do atraso de disparo da transição  $t_i$ , se ela é uma transição temporal,
- um peso utilizado para a computação de probabilidades de disparo de transições imediatas, se  $t_i$  é uma transição imediata.

Os modelos de GSPN contém dois tipos de transições:

- transições temporais, que são associadas aos atrasos de disparo distribuídos de acordo com uma fdp exponencial,
- transições imediatas, que disparam em tempo zero com prioridade sobre as transições temporais.

Além disso, são permitidos arcos inibidores, podem ser utilizados níveis diferentes de prioridades nas transições imediatas, e pesos estão associados às transições imediatas.

Na representação gráfica de GSPN, as transições imediatas são desenhadas como retângulos pretos e transições temporais como retângulos brancos.

Um exemplo de modelo em GSPN representando a rede de filas M/M/1/3 é exibido na figura 13. Neste exemplo, as transições Fonte e TServiço são temporais; a transição VaiServir é imediata; os lugares são KFile, Fila, ServOcupado e ServLivre; há duas fichas no lugar KFile e uma ficha no lugar ServLivre. Formalmente, esta GSPN é descrita da seguinte forma:

- $GSPN = (P, T, P, A, E, H, Z, M_0, W)$ , na qual:
- $(P, T, A, E, H, Z, M_0)$  é uma rede de Petri, na qual:
  - $P = (KFile, Fila, ServLivre, ServOcupado)$ ;
  - $T = (Fonte, VaiServir, TServiço)$ ;
  - $A = ((KFile, Fonte), (Fonte, Fila), (Fila, VaiServir), (VaiServir, KFile), (VaiServir, ServOcupado), (ServOcupado, TServiço), (TServiço, ServLivre), (ServLivre, VaiServir))$ ;
  - $E : A \times (1)$ ;

- $H = \phi$ ;
- $Z : H \times (1)$ ;
- $M_0 = (2,0,1,0)$ ;
- $P = ((\text{Fonte},0), (\text{VaiServir}, 1), (\text{TServiço}, 0))$ ;
- $W = ((\text{Fonte}, 1), (\text{VaiServir}, 1), (\text{TServiço}, 2))$ .

Na marcação exibida na figura 13, a única transição que está habilitada é a transição Fonte, porque há pelo menos uma ficha no lugar KFile. Quando esta transição disparar, uma ficha é removida do lugar KFile e uma ficha é adicionada ao lugar Fila (figura 14).

Na figura 14, as transições Fonte e VaiServir estão habilitadas, entretanto, como as transições imediatas têm prioridade sobre as transições temporais, a transição VaiServir sempre dispara antes da transição Fonte.

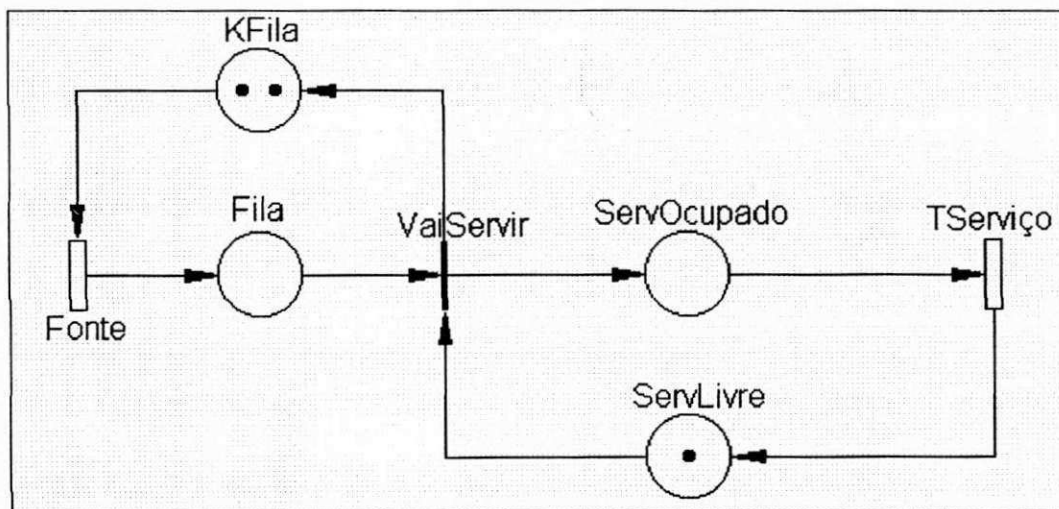


Figura 13 – Modelo em GSPN da rede de fila M/M/1/3 (marcação inicial).



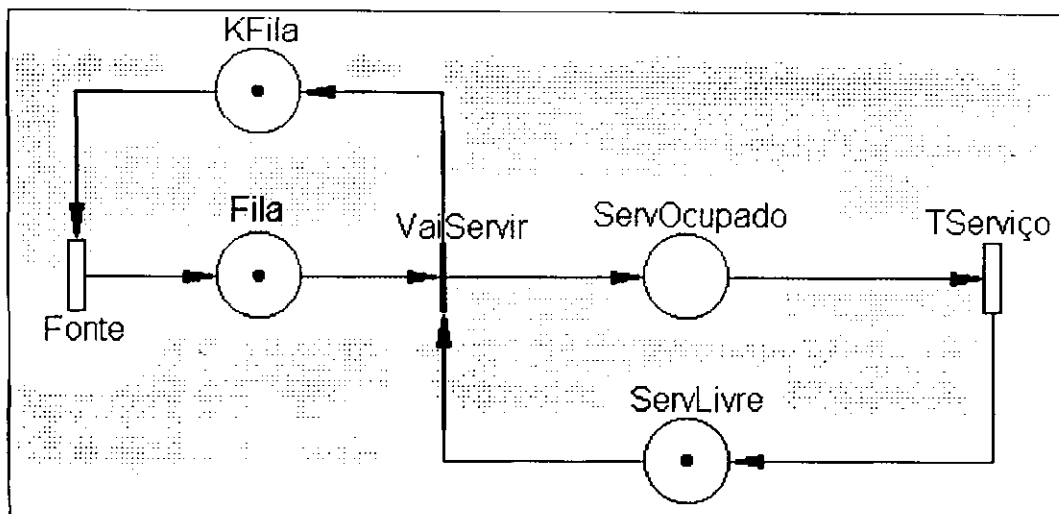


Figura 14 – Modelo em GSPN da rede de fila M/M/1/3 (marcação após a inicial).

Quando uma marcação é alcançada, é necessário descobrir se ela habilita somente transições temporais (marcações tangíveis), ou se habilita pelo menos uma transição imediata (marcações não tangíveis).

O disparo de uma transição é uma operação atômica, isto é, as fichas são removidas dos lugares de entrada e depositadas nos lugares de saída em uma operação indivisível no tempo.

Um atraso de disparo é associado com cada transição temporal. Ele especifica a quantidade de tempo que deve ser aguardado antes que a transição possa disparar. O atraso no disparo é uma variável aleatória com fdp exponencial. O parâmetro da fdp associada com a transição  $t_i$  é a taxa de disparo associada a ela,  $\lambda_i$ . Essa taxa de disparo pode ser dependente de marcação, dessa forma, ela deve ser escrita  $\lambda_i(M_j)$ . O atraso médio no disparo da transição  $t_i$ , na marcação  $M_j$  é  $\frac{1}{\lambda_i(M_j)}$ .

Duas interpretações das operações de uma transição temporal são possíveis. A primeira assume que quando uma nova marcação ocorre, cada transição temporal habilitada gera uma amostra randômica de sua fdp. A transição que gerar a menor amostra de atraso de disparo é a que irá disparar, determinando, assim, a mudança de marcação. Dessa forma, o tempo de permanência em uma marcação é igual ao menor valor de atraso de disparo amostrado. A nova marcação é obtida com as regras de redes de Petri, e o processo é reiniciado.

A segunda interpretação assume que quando uma mudança de marcação habilita uma transição temporal que não foi previamente habilitada desde seu último disparo, essa transição gera uma amostra randômica do atraso de disparo da fdp exponencial associada, e ajusta um relógio para o valor amostrado. Enquanto a transição está habilitada, o relógio é decrescido em uma velocidade constante, possivelmente dependente de marcação. Se a transição é desabilitada pelo disparo de uma transição conflitante, o relógio pára, e reinicia, possivelmente com uma velocidade diferente, quando a transição for habilitada novamente. Quando o relógio alcançar o valor zero, a transição dispara.

A grande utilidade da última interpretação é a possibilidade de associar atividades com as transições.

No caso de uma marcação não tangível, a seleção de qual transição disparar não pode ser baseada em uma descrição temporal, já que todas as transições imediatas disparam em tempo zero. A escolha é baseada em prioridades e pesos. O conjunto de transições com o mais alto nível de prioridade é selecionado, e se ele contém mais de uma transição, a próxima seleção, de natureza probabilística, é baseada nos pesos das transições de acordo com a expressão:  $P\{t_k\} = \frac{w_k}{\sum_{t_i \in E(M)} w_i}$ , onde  $E(M)$  é o conjunto de todas as transições imediatas habilitadas na marcação  $M$ .

A semântica de uma GSPN sempre assume que as transições são disparadas uma por uma, mesmo em uma marcação não tangível contendo transições imediatas habilitadas e não conflitantes.

Um sistema modelado em GSPN pode ser analisado qualitativamente ou quantitativamente.

A análise qualitativa de um modelo em GSPN é realizada através do grafo de alcançabilidade da rede de Petri que está descrita na definição da GSPN, pois o conjunto de alcançabilidade de um modelo em GSPN é igual ao dessa rede de Petri. Dessa forma, propriedades como as contempladas por esta dissertação, vivacidade e limitação, podem ser analisadas. Por exemplo, a análise qualitativa da GSPN da figura 13 é realizada

através do grafo de alcançabilidade da rede de Petri exibida na figura 15, que está na definição formal da rede da figura 13.

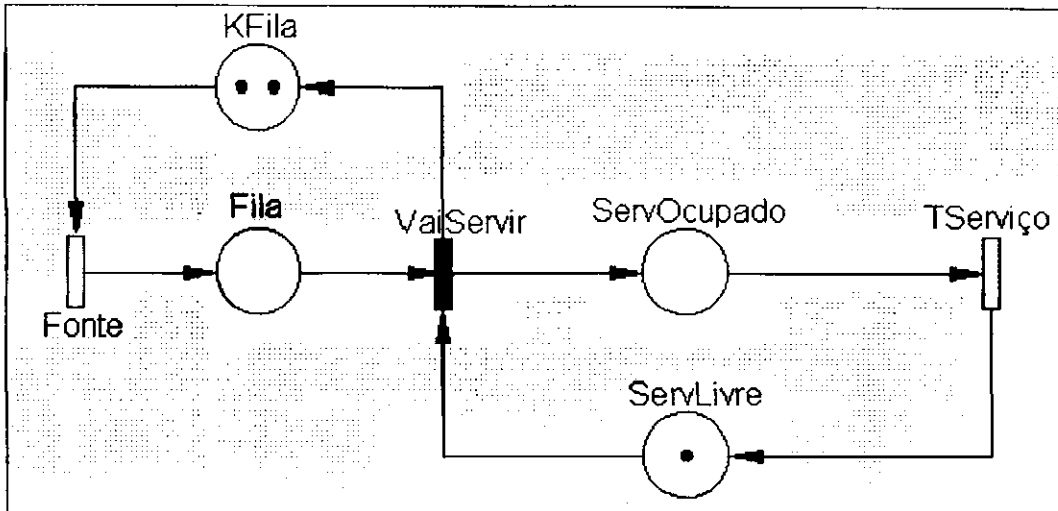


Figura 15 - Rede de Petri utilizada para obter o grafo de alcançabilidade da GSPN da figura 13.

A existência de um isomorfismo entre modelos construídos em GSPN e cadeias de Markov [MOLL, 1982] [MARS, 1989] [MARS, 1995] viabiliza a análise quantitativa.

Segundo [MOLL, 1982], dois sistemas de transições estocásticos são isomórficos se ocorre o seguinte:

- Há um mapeamento bijetor entre os espaços de estados dos sistemas;
- uma transição em um dos sistemas  $S_u \rightarrow S_v \leftrightarrow$  uma transição no outro sistema  $F(S_u) \rightarrow F(S_v)$ ;
- A probabilidade  $P[S_u \rightarrow S_v, \tau] = P[F(S_u) \rightarrow F(S_v), \tau]$ .

Com isso, [MOLL, 1982] chegou ao seguinte teorema: “qualquer rede de Petri estocástica marcada, com um número finito de lugares e transições, é isomórfica a um processo de Markov unidimensional de espaço discreto”.

Em GSPN, de acordo com [MARS, 1989] e [MARS, 1995], o isomorfismo é obtido a partir do grafo de alcançabilidade, que é reduzido com a eliminação das marcações não tangíveis e com as taxas das transições que causam mudança de marcação servindo de nome para os arcos [MARS, 1989]. A análise quantitativa pode ser efetuada

quando a contração do grafo de alcançabilidade, que é uma cadeia de Markov, é solucionada [MARS, 1995].

O grafo de alcançabilidade da figura 13 é exibido na figura 16, de acordo com as seguintes considerações:

- os lugares estão dispostos no vetor de marcação dessa forma: (Fila,KFila,ServOcupado,ServLivre);
- a taxa média de disparo da transição Fonte é  $\lambda$  e a da transição Tserviço é  $\mu$ ;
- a transição imediata VaiServir está representada como  $t_1$ .

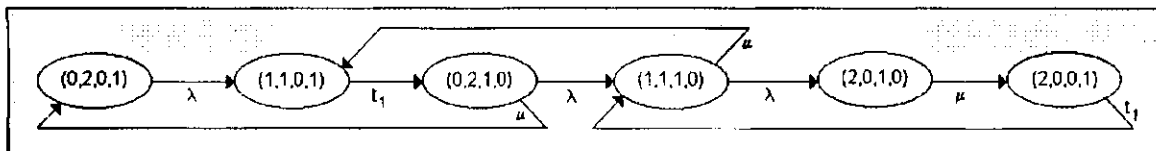


Figura 16 - Grafo de alcançabilidade do modelo da rede de fila M/M/1/3.

As marcações tangíveis de acordo com o grafo de alcançabilidade da figura 16 são: (0,2,0,1), (0,2,1,0), (1,1,1,0) e (2,0,1,0). Essas marcações dão origem a uma estrutura isomórfica à cadeia de Markov associada ao modelo da rede de fila M/M/1/3. A figura 17 exhibe a estrutura resultante da contração do grafo de alcançabilidade, contendo apenas as marcações tangíveis. A figura 18 mostra a cadeia de Markov do modelo de rede de fila M/M/1/3 com as mesmas taxas médias do modelo construído em GSPN.

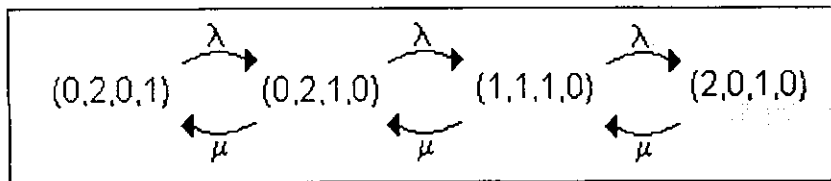


Figura 17 - Contração do grafo de alcançabilidade do modelo da rede de fila M/M/1/3.

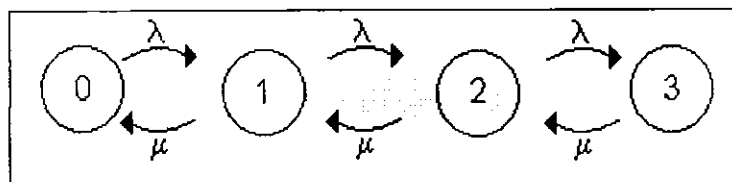


Figura 18 - Cadeia de Markov do modelo de rede de fila M/M/1/3.

As estruturas das figuras 17 e 18 são isomórficas. Dessa forma, o modelo da rede de fila M/M/1/3 construído em GSPN pode ser solucionado pela cadeia de Markov correspondente, pois o número de estados e o número de transições entre estados na cadeia de Markov são exatamente iguais ao número de marcações tangíveis e ao número de mudanças de marcações, respectivamente, da estrutura obtida com a contração do grafo de alcançabilidade.

Além disso, pode-se afirmar, para o exemplo da figura 13, que os estados da cadeia de Markov são idênticos às marcações tangíveis do modelo em GSPN, desde que se aplique o seguinte critério:

- Estado da Cadeia de Markov = Quantidade de Fichas no Lugar Fila na Marcação Correspondente + Quantidade de Fichas no Lugar ServOcupado na Mesma Marcação.

O estado (0) da cadeia de Markov da figura 18 tem o seu correspondente (0,2,0,1) na figura 17. Aplicando o critério acima, tem-se que:

- $(0) = (0 + 0) \Rightarrow (0) = (0)$
- $(1) = (0 + 1) \Rightarrow (1) = (1)$
- $(2) = (1 + 1) \Rightarrow (2) = (2)$
- $(3) = (2 + 1) \Rightarrow (3) = (3)$

## **Capítulo 4 - Representação dos Elementos de Modelagem do SAVAD em GSPN**

### ***4.1. Introdução***

Este capítulo mostra a representação dos elementos de modelagem do SAVAD através de modelos em GSPN.

Os resultados do estudo apresentado nesta dissertação mostram que a conexão dos mesmos elementos de modelagem em ambos os paradigmas, na mesma ordem, geram modelos markovianos que apresentam cadeias de Markov equivalentes. Exemplos desses modelos são apresentados no capítulo 5.

### ***4.2. Fregueses***

Para representar os fregueses em GSPN, utilizam-se as fichas. Um problema dessa representação é a impossibilidade de identificar os fregueses por um índice único, como ocorre em redes de filas, isso dificulta a caracterização das políticas de escalonamento por parte dos elementos da rede. Uma solução para este problema é admitir que as fichas carregam pelo menos um atributo, o índice do freguês, e que as transições tratem esse índice para fins de escalonamento dos fregueses.

Como a política de escalonamento não altera os resultados qualitativos de uma GSPN representando uma rede de fila, será utilizada a ficha sem atributo para representar os fregueses.

### ***4.3. Estações de Serviço***

As estações de serviços representam os recursos de um sistema. Para a modelagem em GSPN, elas são compostas por duas partes distintas: fila e servidor(es). Os fregueses que circulam no modelo, ao encontrarem uma estação de serviço livre são servidos, ou esperam na fila, se todos os servidores estiverem ocupados.

A fila é o lugar onde os fregueses aguardam pela liberação de algum servidor. As filas podem ser ilimitadas: não há restrição quanto ao número de fregueses que elas podem suportar; ou limitadas: há uma capacidade máxima de fregueses que elas podem suportar. No último caso, se ocorrer a chegada de um freguês e a fila estiver cheia, este freguês é descartado. Além disso, cada fila tem uma política de escalonamento associada, entretanto, não há a necessidade de modelá-la em GSPN, já que essa política de escalonamento não altera os resultados da análise do sistema.

O servidor é responsável por representar o recurso de fato. Cada servidor pode estar ocupado ou livre. Associada a um servidor tem-se uma função densidade de probabilidade (fdp), que para atender aos objetivos desta dissertação deve ser exponencial.

Em [MARS, 1989], uma representação para uma estação de serviço foi apresentada. O que está nesta dissertação é uma generalização desta descrição, conforme apresentado a seguir.

Uma forma geral para representar servidores é exibida na figura 19, quando uma mesma taxa média de serviço está associada com todos os servidores. A transição TFora, exibida na figura 19, não faz parte do modelo de estação de serviço generalizada e, além disso, pode ser imediata ou temporal. Essa transição faz parte de outro elemento que está conectado antes da estação de serviço. Ela está no exemplo para indicar que os arcos vindo e indo, respectivamente, dos lugares KFile e Fila devem ser conectados a uma transição em comum.

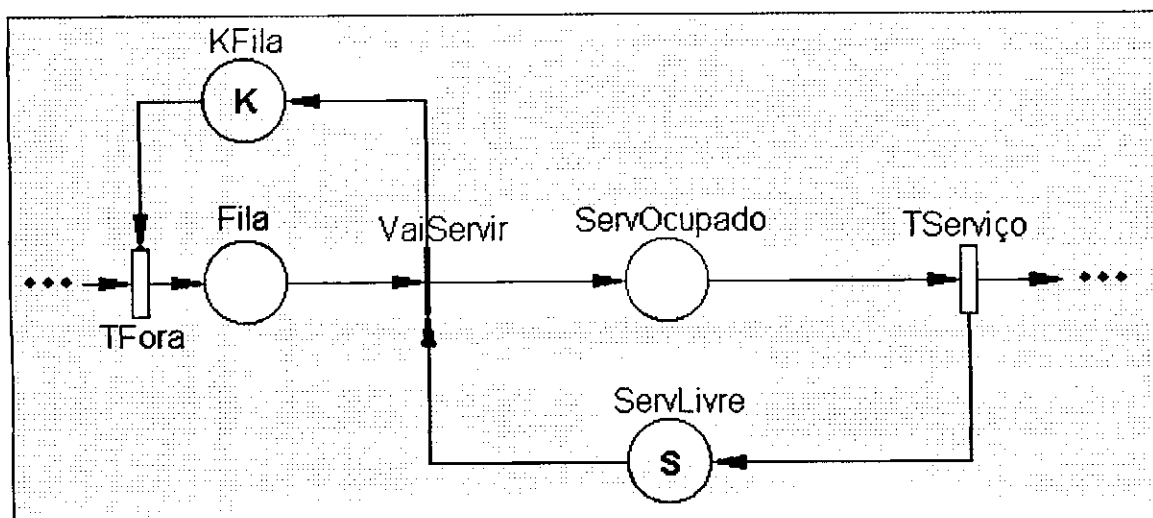


Figura 19 - Estação de serviço generalizada.

O lugar Fila modela a fila da estação de serviço. O número de fregueses em fila em um dado instante é modelado pelo número de fichas neste lugar. Ele deve ser conectado por um arco de entrada proveniente de uma transição qualquer, e um arco de saída para a transição VaiServir, uma vez que após aguardar em fila o freguês deve ser servido.

O lugar Kfila representa o comprimento da fila. O número de fichas nesse lugar, K na figura 19, indica a quantidade de lugares vazios na fila do modelo. Quando existir, deve ser conectado por um arco de saída para a mesma transição que tem um arco de saída para o lugar Fila, e um arco de entrada da transição VaiServir. Quando a fila tem comprimento infinito, esse lugar não deve ser modelado.

O lugar ServOcupado representa o estado do sistema no qual algum servidor está ocupado. O número de fichas neste lugar representa os fregueses que estão sendo servidos num certo momento. Ele deve ser conectado por uma transição de entrada partindo da transição VaiServir, e um arco de saída conectado à transição TServiço.

O lugar ServLivre representa o estado do sistema no qual algum servidor está livre. O número de fichas neste lugar, S na figura 19, representa quantos servidores estão livres em um determinado momento. Ele deve ser conectado por um arco de saída para a transição VaiServir, e um arco de entrada da transição TServiço.

A transição VaiServir é imediata, já que ela apresenta um processamento interno, e livre de especificações temporais, da estação de serviço, que não é exibida no SAVAD. Os estados gerados pelo disparo dessa transição não interferem na cadeia de Markov gerada pelo modelo.

A transição TServiço modela o tempo de serviço, descrito pela taxa (ou média) de uma fdp exponencial. Os estados gerados por essa transição são tangíveis e, portanto, são os determinantes na geração da cadeia de Markov do modelo.

A estação de serviço generalizada em GSPN cobre todas as configurações de estações de serviço apresentadas no SAVAD, as quais são: servidor simples, servidor múltiplo e servidor infinito, todos com fila de capacidade limitada ou capacidade infinita.



Uma observação deve ser feita com relação ao comprimento de fila: o SAVAD assume como comprimento de fila a soma entre o tamanho da fila propriamente dita, e o número total de servidores. Por exemplo, quando um modelo é submetido ao SAVAD com comprimento de fila 5 e servidor único, deve ser interpretado como capacidade da fila igual a 4 e número de servidor igual a 1.

O modelo GSPN de estação de serviço com servidor simples e comprimento de fila infinito é exibido na figura 20. O mesmo modelo, com comprimento máximo de fila 4 é exibido na figura 21. Vale salientar que, na figura 21, a transição TFora não faz parte do modelo de estação de serviço e que ela pode ser temporal ou imediata. Essa transição faz parte de outro elemento que está conectado antes da estação de serviço. Ela está no exemplo para indicar que os arcos vindo e indo, respectivamente, dos lugares KFile e Fila devem ser conectados a uma transição em comum.

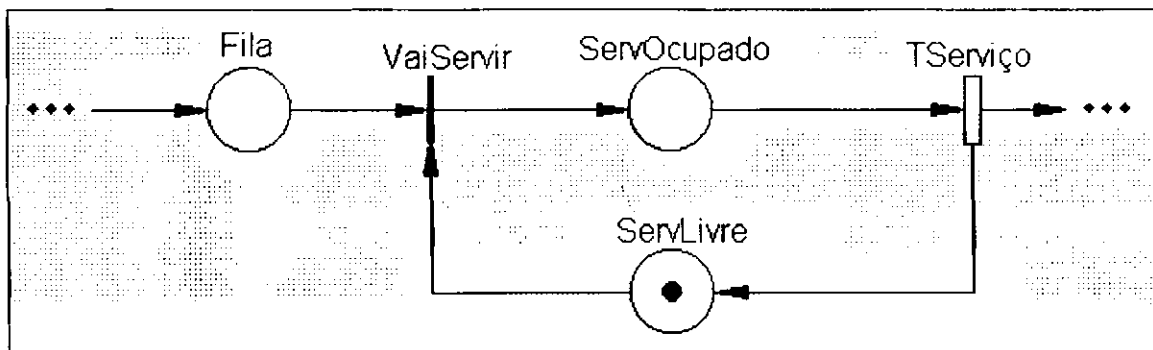


Figura 20 – Estação de serviço com servidor simples e fila de comprimento infinito.

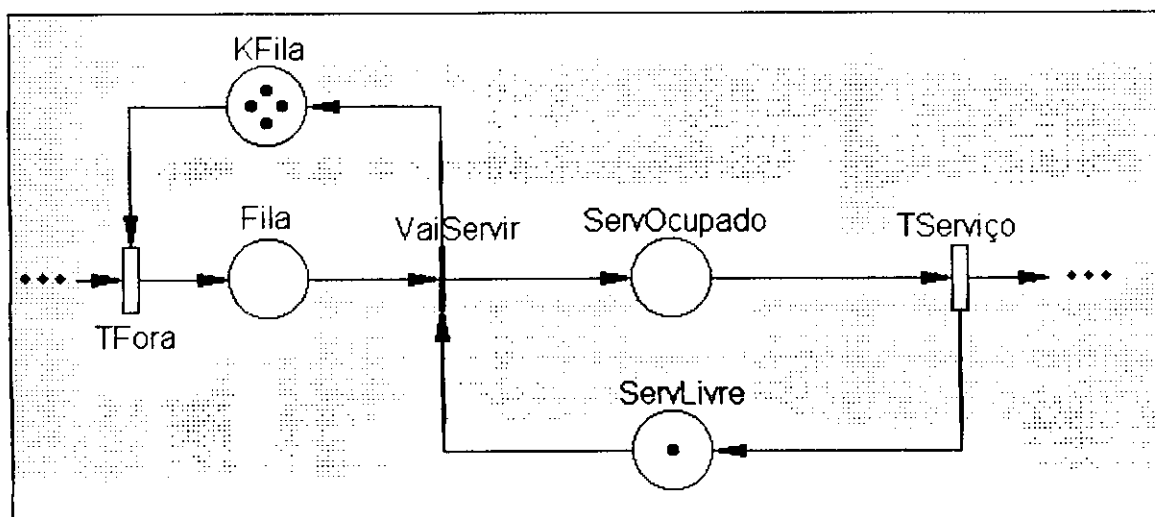


Figura 21 - Estação de serviço com servidor simples e comprimento máximo de fila igual a 4.

A estação de serviço com 3 servidores e comprimento de fila infinito é exibida na figura 22 e com comprimento máximo de fila 7 na figura 23 (vale salientar que no SAVAD esta estação de serviço é descrita com o comprimento de fila igual a 10). Na figura 23, a transição TFora não faz parte do modelo de estação de serviço e que ela pode ser temporal ou imediata. Essa transição é parte de outro elemento que está conectado antes da estação de serviço. Ela está no exemplo para indicar que os arcs vindo e indo, respectivamente, dos lugares Kfila e Fila devem ser conectados a uma transição em comum.

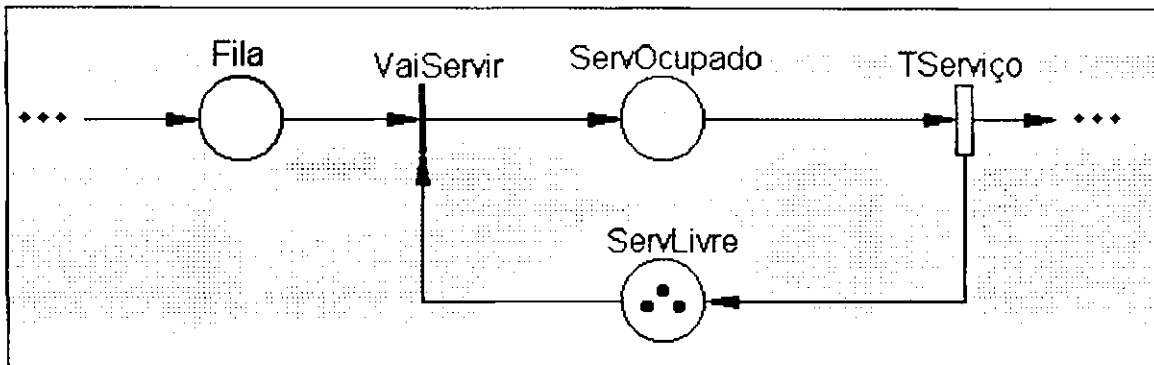


Figura 22 - Estação de serviço com 3 servidores e fila infinita.

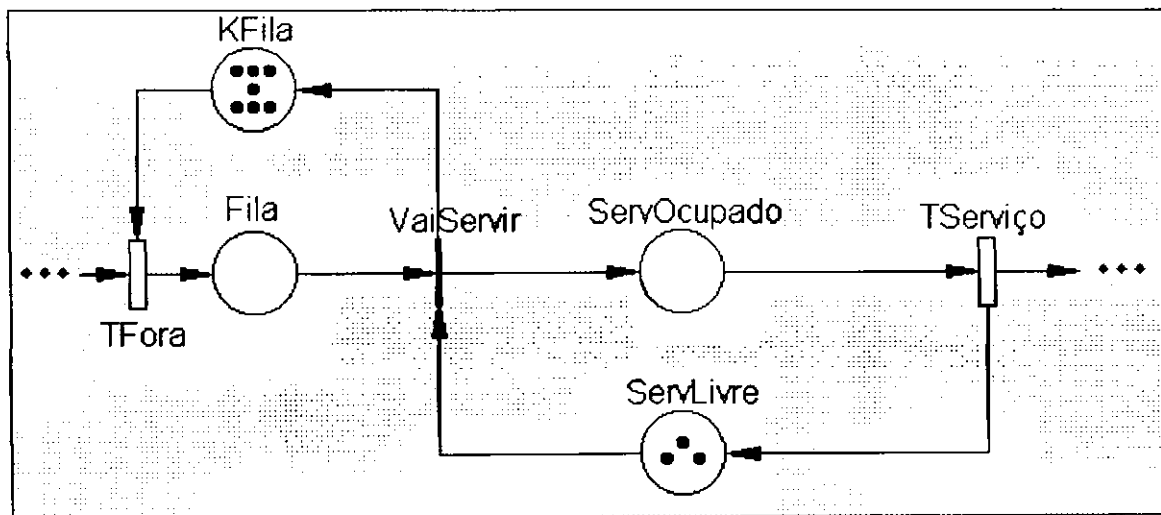


Figura 23 - Estação de serviço com 3 servidores e comprimento máximo de fila igual a 7.

A estação de serviço com servidor infinito é apresentada na figura 24. Não há fila neste modelo, pois todo freguês que chega deve encontrar um servidor livre.

A representação de um sorvedouro em GSPN não é necessária. Isso porque ele é um elemento que apenas elimina fregueses nos modelos de redes de filas abertas e, com isso, a sua adição (ou abstenção) não influencia na equivalência entre os modelos mais complexos exibidos no capítulo 5.

### **4.7. Ponto de Fusão**

Os fregueses que chegam em um ponto de fusão devem aguardar nas respectivas entradas, pois a fusão só ocorre quando há pelo menos um freguês em cada entrada.

Em GSPN, o ponto de fusão é representado pela ligação de duas ou mais transições, em um mesmo lugar para a fusão propriamente dita, dois ou mais lugares para o controle da fusão e de uma transição imediata. Todos os arcos envolvidos no ponto de fusão têm peso 1, exceto o que liga o lugar onde ocorre a fusão e a transição de saída, este arco deve ter peso igual ao número de entradas do ponto de fusão.

A figura 5 mostra um o ponto de fusão do SAVAD. A figura 26 mostra o mesmo ponto de fusão em GSPN.

Na figura 26 observa-se o seguinte: as transições *Entrada1*, ..., *EntradaN* não fazem parte do elemento, são transições provenientes de outros elementos que estão conectados à entrada do ponto de fusão. Os lugares *Flag1*, ..., *FlagN*, são utilizados para controlar o sincronismo, fazendo com que a transição *SaiPontoFusão* só esteja habilitada quando todas as transições de entrada (*Entrada1*, ..., *EntradaN*) tiverem disparado. Quando a transição *SaiPontoFusão* dispara,  $N$  ( $N \in \mathbb{N}^*$ ) fichas (fregueses) são removidas do lugar *PontoFusão* e colocadas no lugar que estiver conectado à transição *SaiPontoFusão*.

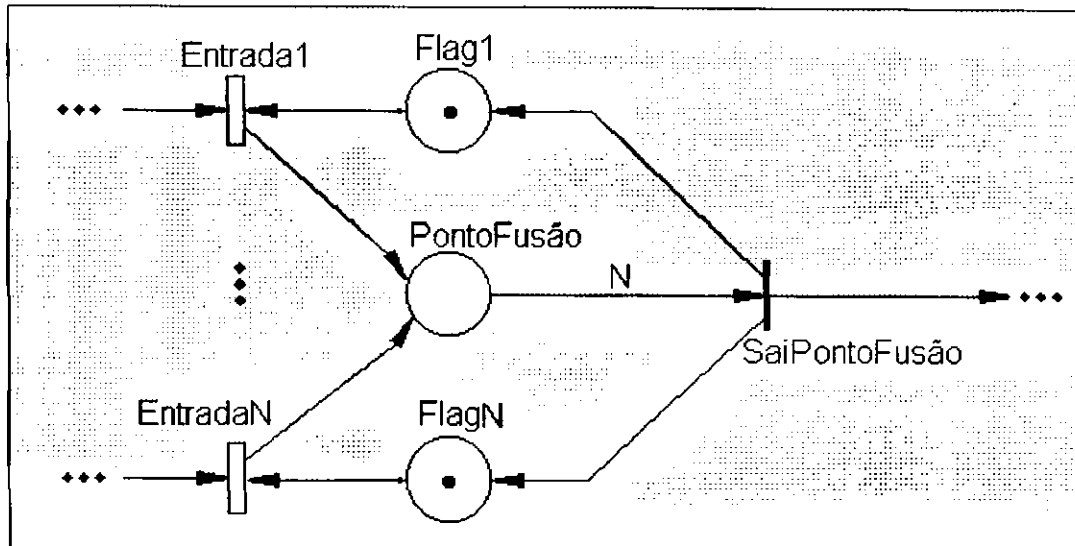


Figura 26 - Ponto de fusão.

#### 4.8. Ponto de Multiplicação

Os fregueses que chegam em um ponto de multiplicação são reproduzidos para cada uma de suas saídas e, possivelmente, seguem rotas diferentes.

O ponto de multiplicação é representado em GSPN como a extensão de uma transição do modelo, fazendo dela uma transição do tipo “fork” (“garfo”). Dessa forma não há a introdução de estados não tangíveis no modelo.

A figura 4 mostra a representação gráfica do ponto de multiplicação para o SAVAD. O ponto de multiplicação em GSPN é exibido na figura 27.

Na figura 27 é observado o seguinte: as transições TransiçãoT e TransiçãoI são, respectivamente, temporal e imediata, e pertencem ao elemento que se conecta com a entrada do ponto de multiplicação. O ponto de multiplicação em si é apenas o conjunto de arcos de saída dessas transições, que estão representados por Arco1, ..., ArcoN ( $N \in \mathbb{N}^*$ ).

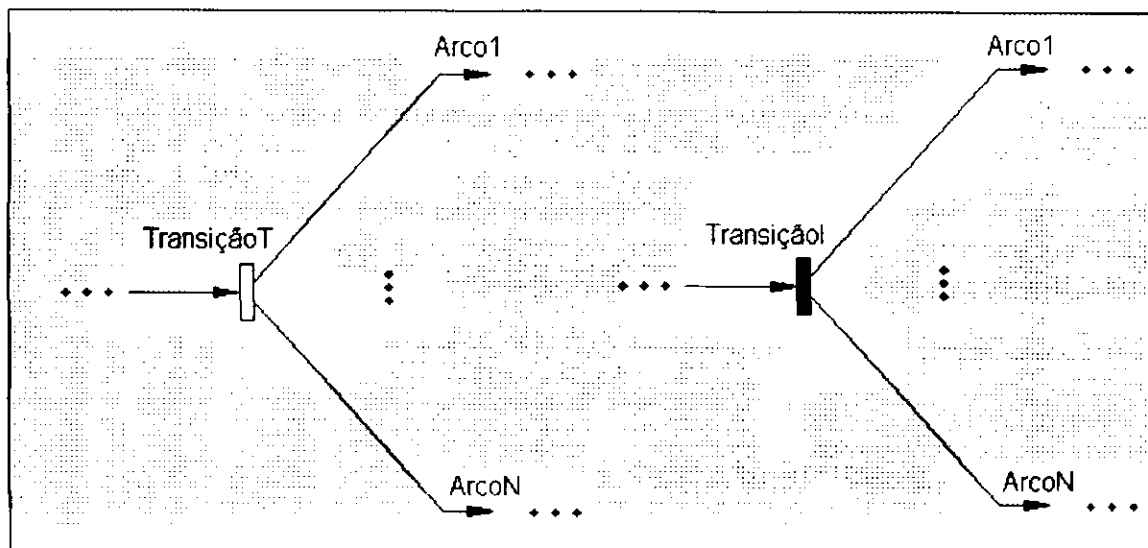


Figura 27 - Ponto de multiplicação.

#### 4.9. Ponto de Sincronização

Em GSPN, este elemento de modelagem pode ser descrito utilizando lugares para as filas de entrada, arcos com pesos para as condições de espera, uma transição imediata e arcos com pesos nas saídas. Com isso, todas as situações de entrada podem ser representadas, porém, para fins de simplificação, apenas a liberação de  $n$  fregueses ( $n \in \mathbb{N}^*$ ) será modelada em GSPN.

A representação gráfica da primeira configuração da figura 6, ponto de sincronização com duas entradas e duas saídas correspondentes, para o SAVAD, é exibida na figura 28 em GSPN.

Na figura 28 observa-se o seguinte: a transição  $Pt\_Sinc$  só fica habilitada a disparar quando os lugares  $Entrada1$  e  $Entrada2$  contiverem  $m$  e  $n$  ( $m, n \in \mathbb{N}^*$ ) fichas, respectivamente. Quando a transição disparar, são removidas  $n$  fichas do lugar  $Entrada1$  e  $m$  fichas do lugar  $Entrada2$ . Os lugares que estiverem conectados nos fins do arcos que saem da transição  $Pt\_Sinc$  recebem  $x$  e  $y$  ( $x, y \in \mathbb{N}^*$ ) fichas, respectivamente.

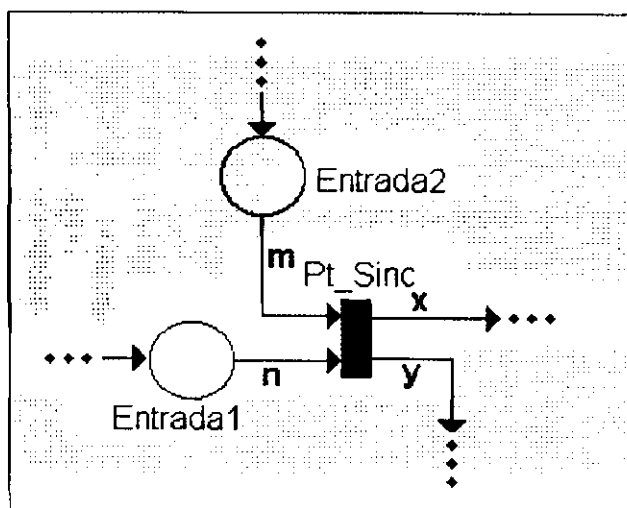


Figura 28 - Ponto de sincronização com duas entradas e duas saídas correspondentes.

A segunda configuração mostrada na figura 6, que é um ponto de sincronização com duas entradas e uma saída, para o SAVAD, tem o seu equivalente, em GSPN, exibido na figura 29.

Na figura 29 observa-se o seguinte: a transição  $Pt\_Sinc$  só fica habilitada a disparar quando os lugares  $Entrada1$  e  $Entrada2$  contiverem  $m$  e  $n$  ( $m, n \in \mathbb{N}^*$ ) fichas, respectivamente. Quando a transição disparar, são removidas  $n$  fichas do lugar  $Entrada1$  e  $m$  fichas do lugar  $Entrada2$ . O lugar conectado no fim do arco que sai da transição  $Pt\_Sinc$  recebe  $x$  ( $x \in \mathbb{N}^*$ ) fichas.

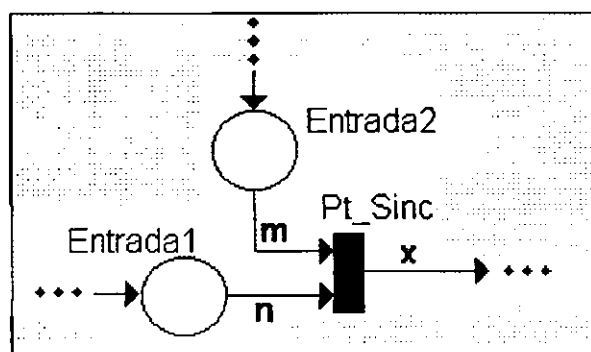


Figura 29 - Ponto de sincronização com duas entradas e uma saída.

Já a terceira configuração da figura 6, um ponto de sincronização com uma entrada e uma saída, para o SAVAD, é exibida na figura 30, em GSPN.

Na figura 30 observa-se o seguinte: a transição Pt\_Sinc só fica habilitada a disparar quando o lugar Entrada contiver  $n$  ( $n \in \mathbb{N}^*$ ) fichas. Quando a transição disparar, são removidas  $n$  fichas do lugar Entrada. O lugar conectado no fim do arco que sai da transição Pt\_Sinc recebe  $x$  ( $x \in \mathbb{N}^*$ ) fichas.

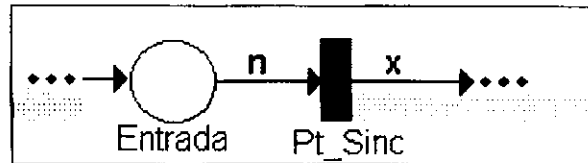


Figura 30 - Ponto de sincronização com uma entrada e uma saída.

#### 4.10. Ponto Escalonador

Independente da política de escalonamento, a representação gráfica de um ponto escalonador no SAVAD é única (Figura 7).

Em GSPN, cada política de escalonamento do elemento de modelagem deve ser representada por uma rede diferente.

O ponto escalonador com política de escalonamento randômica é o mais simples de modelar em GSPN, pois há uma correspondência de um para um entre o número de lugares e o número de filas de entrada do mesmo elemento no SAVAD, e a aleatoriedade da política de escalonamento é modelada em GSPN através de transições imediatas paralelas, sem a necessidade de transições temporais. O escalonamento ocorre, de forma randômica, quando há fichas em qualquer lugar que represente uma fila.

Os estudos realizados indicam que um modelo que utiliza o ponto escalonador com política de escalonamento randômica contém o menor espaço de estados em sua cadeia de Markov do que o mesmo modelo contendo um ponto escalonador com a política de escalonamento cíclica ou livre.

Na figura 31, é exibido um ponto escalonador com três filas de entrada, política de escalonamento randômica e liberação de um freguês por vez. Nesta figura, observa-se o seguinte: os lugares Fila1, Fila2 e Fila3 representam as filas de entrada do elemento. As transições Escalona1, Escalona2 e Escalona3 são responsáveis pelo escalonamento randômico dos fregueses que chegam nos lugares de entrada. Supondo

que as três transições estejam habilitadas, a escolha de qual transição dispara é feita de forma randômica, de acordo com a regra de disparo exibida no capítulo 3.

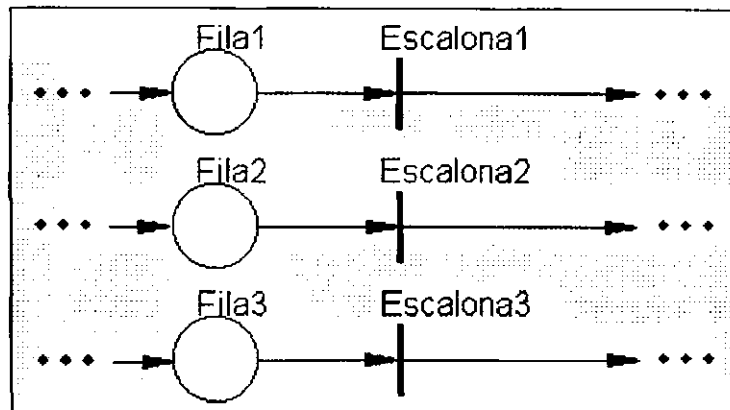


Figura 31 - Ponto escalonador com política de escalonamento randômica.

A implementação da política de escalonamento cíclica no modelo de ponto escalonador em GSPN é realizada com a adição de um controle ao modelo em GSPN do ponto escalonador com política randômica. Esse controle adicional é composto pela associação de um lugar e uma transição temporal a cada lugar que representa uma fila do ponto escalonador. Uma ficha nesse lugar adicional indica que a fila (lugar representando fila) associada a ele está pronta para o escalonamento. A transição temporal representa a passagem da vez para a próxima fila do ponto escalonador. A transição é temporal porque a fila permanece pronta para o escalonamento durante algum tempo que, neste caso, segue uma função de distribuição de probabilidades exponencial. A passagem de vez ocorre ou quando um freguês na fila com a vez é escolhido ou quando a fila está vazia e terminou o tempo de escalonamento. O escalonamento ocorre quando o lugar que representa a vez contém uma ficha e há fichas no lugar que representa a fila que está com a vez.

Os estudos realizados indicam que um modelo que utiliza o ponto escalonador com política de escalonamento cíclica contém um espaço de estados da cadeia de Markov maior que o do mesmo modelo com o ponto escalonador com política de escalonamento randômica e menor que o mesmo modelo com o ponto escalonador com política de escalonamento livre. Além disso, o espaço de estados da cadeia de Markov de um modelo com o ponto escalonador com política de escalonamento cíclica cobre o espaço de estados da cadeia de Markov do mesmo modelo com o ponto



escalonador com política de escalonamento randômica, comprovando que ele é uma especialização do ponto escalonador com política de escalonamento randômica.

Na figura 32, é exibido um ponto escalonador, representado em GSPN, com três filas de entrada, política de escalonamento cíclica (na ordem Fila1, Fila2, Fila3) e liberação de um freguês por vez. Nesta figura, observa-se o seguinte: os lugares Fila1, Fila2 e Fila3 representam as filas de entrada do ponto escalonador. Os lugares Ficha1, Ficha2 e Ficha3 representam a vez de escalonamento dos respectivos lugares associados (Fila1, Fila2 e Fila3, respectivamente). A presença de uma ficha no lugar Ficha1 indica que o lugar Fila1 está pronto para ser escalonado. As transições PassaFicha1, PassaFicha2 e PassaFicha3 são responsáveis por passar a ficha que está no lugar Ficha1, na marcação inicial abaixo, para os lugares Ficha2, Ficha3, Ficha1, Ficha2, ..., caracterizando o escalonamento cíclico das filas de entrada. As transições Escalona1, Escalona2 e Escalona3 representam o escalonamento dos fregueses em si. O escalonamento de uma fila, por exemplo Fila1, só ocorre quando houver fichas no lugar Fila1 e uma ficha no lugar Ficha1; dessa forma, quando a transição Escalona1 dispara, uma ficha é removida do lugar Fila1 e adicionada ao lugar conectado na saída da transição Escalona1 e a ficha do lugar Ficha1 passa para o lugar Ficha2. A passagem de ficha sem escalonamento de fregueses na transição PassaFicha1 ocorre quando não há ficha em Fila1 e há uma ficha no lugar Ficha1; assim sendo, quando a transição PassaFicha1 dispara, apenas a ficha que está no lugar Ficha1 passa para o lugar Ficha2.

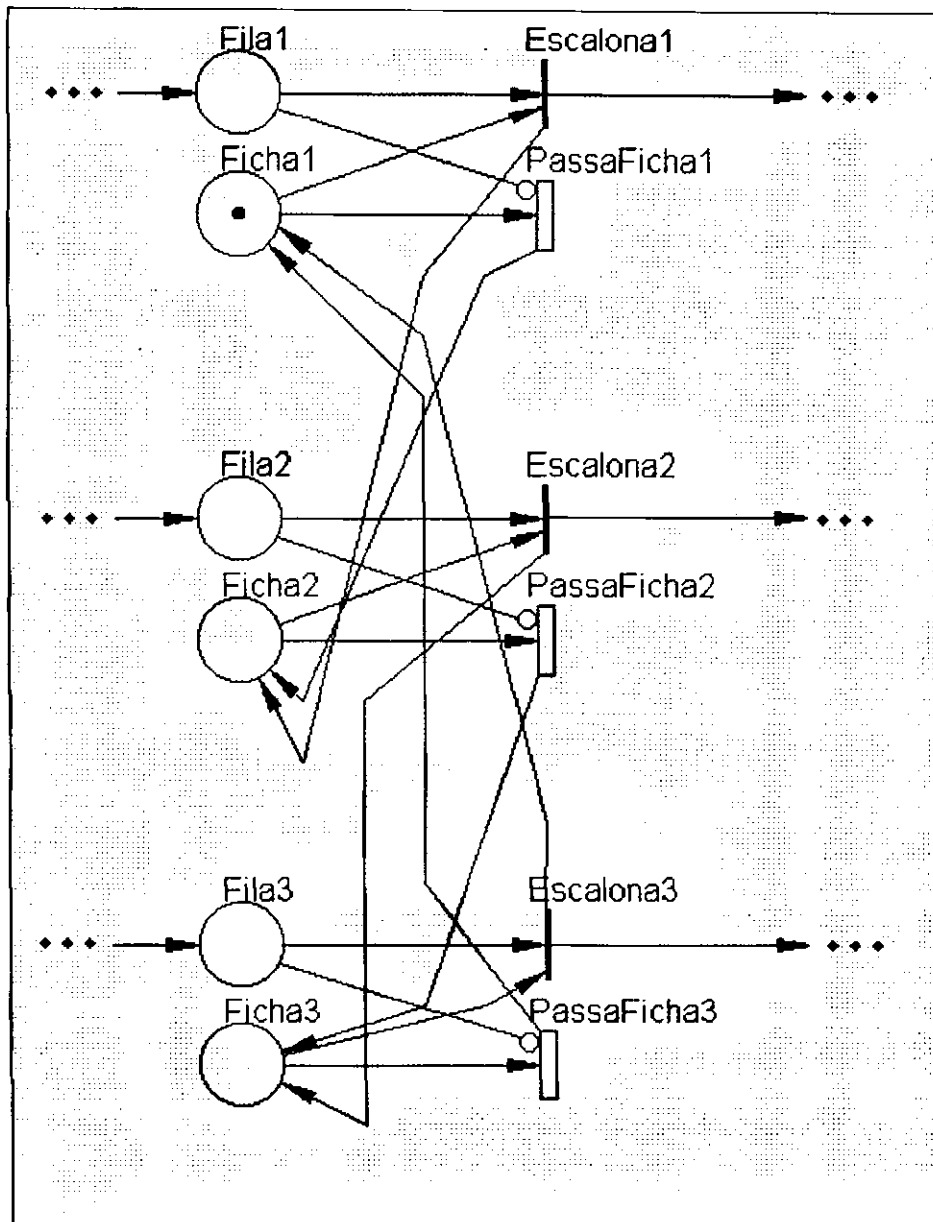


Figura 32 - Ponto escalonador com política de escalonamento cíclica.

O modelo em GSPN do ponto escalonador com política de escalonamento livre também é uma especialização do modelo em GSPN do ponto escalonador com política de escalonamento randômica. Nesse caso, um teste é adicionado para cada par de lugares representando as filas do ponto escalonador. Toda vez que qualquer par de lugar representando as filas contiver pelo menos uma ficha, estes lugares são bloqueados por um período determinado de tempo e são liberados para as respectivas filas novamente. Isso é representado no modelo, para cada par de lugares, por uma transição imediata, para realizar o teste, dois lugares, onde as fichas (fregueses) ficam aguardando a liberação, e duas transições temporais, que representam o tempo que cada freguês fica bloqueado. As transições imediatas de teste devem ter maior prioridade que as transições

de escalonamento. O escalonamento só ocorre quando houver pelo menos uma ficha em apenas um dos lugares que representam filas.

Um modelo com o ponto escalonador de política de escalonamento livre é o que tem o maior espaço de estados quando comparado ao mesmo modelo com um ponto escalonador com a política cíclica ou randômica. Isso ocorre devido ao grande número de transições temporais utilizadas para manter as fichas bloqueadas quando houver dois lugares com ficha num mesmo instante de tempo.

Na figura 33, é exibido um ponto escalonador, representado em GSPN, com três filas de entrada, política de escalonamento livre e liberação de um freguês por vez. Nesta figura, observa-se o seguinte: os lugares Fila1, Fila2 e Fila3 representam as filas de entrada do ponto escalonador. As transições imediatas Escalona1, Escalona2 e Escalona3 representam o escalonamento de fregueses das respectivas filas de entrada. As transições imediatas Bloqueia12, Bloqueia13 e Bloqueia23 representam o bloqueio dos fregueses que habilitam o escalonamento quando houver a possibilidade de colisão; a possibilidade de colisão ocorre quando dois lugares, dos que representam as filas de entrada, contém pelo menos uma ficha no mesmo instante de tempo. Neste caso, as fichas são removidas dos lugares de entrada e são colocadas nos lugares de bloqueio (Bloqueia121, Bloqueia122, Bloqueia131, Bloqueia133, Bloqueia232 e Bloqueia233), onde ficam bloqueados até que uma das transições de liberação dispare (Libera121, Libera122, Libera131, Libera133, Libera232 e Libera233) e as fichas retornam aos lugares de origem, estando novamente disponíveis para o escalonamento. O escalonamento de uma fila de entrada, Fila1, por exemplo, ocorre quando houver fichas apenas neste lugar, habilitando a transição Escalona1; quando a transição Escalona1 disparar, uma ficha é removida do lugar Fila1 e é colocada no lugar conectado na saída de Escalona1. Um detalhe importante é que as transições Bloqueia12, Bloqueia13 e Bloqueia23 devem ter prioridades maiores que as das transições Escalona1, Escalona2 e Escalona3, para garantir que o bloqueio de fregueses ocorra sempre antes do escalonamento.

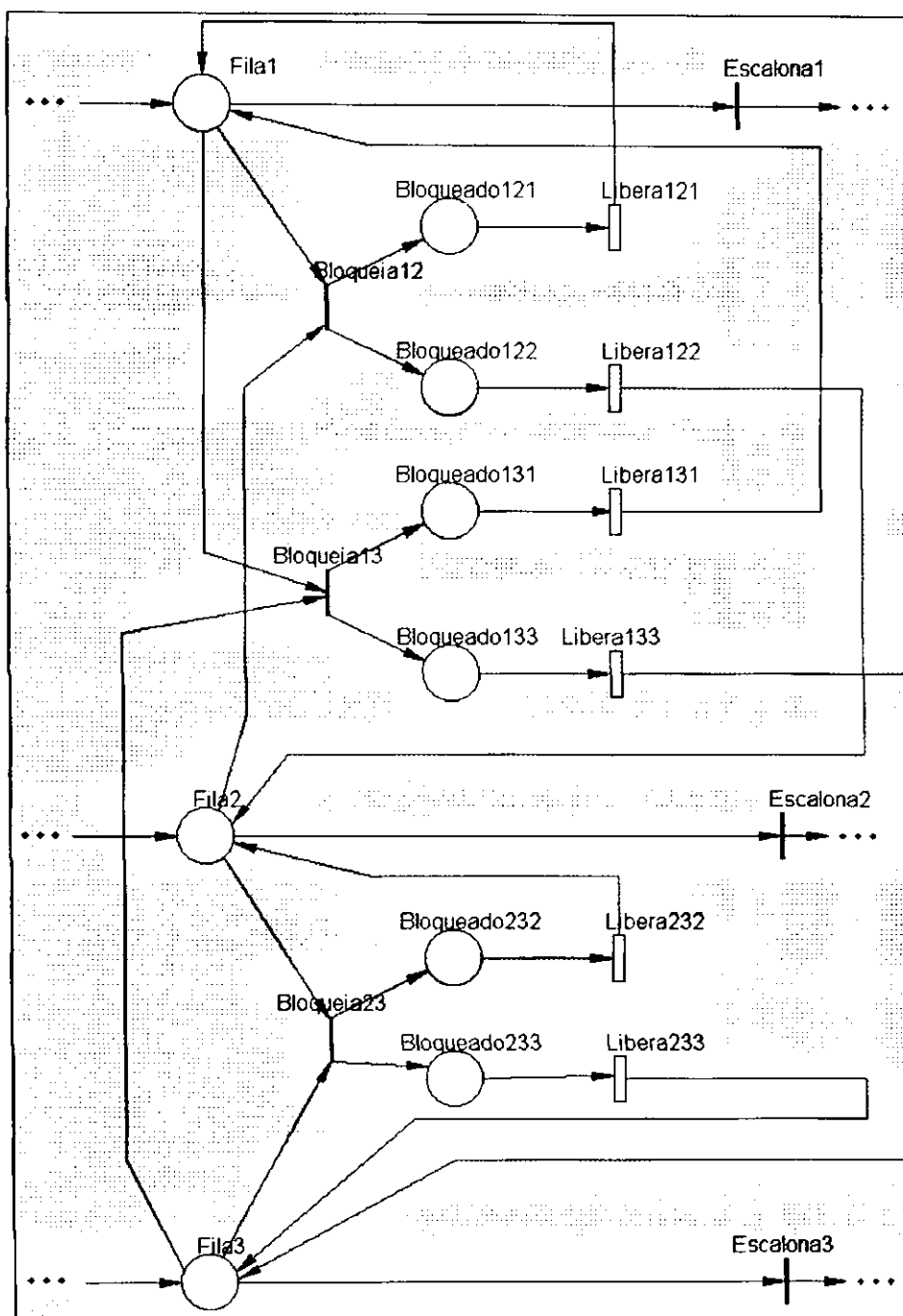


Figura 33 - Ponto escalonador com política de escalonamento livre.

### 4.11. Fila com Capacidade Limitada

As filas são elementos básicos em modelos de redes de filas. Elas representam os lugares onde os fregueses aguardam por um recurso que está ocupado. Nos modelos teóricos, as filas podem ter capacidade infinita, entretanto, na vida real, as filas não têm essa característica, elas têm um tamanho limitado. Por exemplo, uma fila de impressão está limitada pela quantidade de memória que está alocada para ela. No SAVAD, as filas com capacidade limitada são descritas explicitamente pelo modelo.

Uma fila com capacidade limitada é modelada por dois lugares, um para representar a fila em si, conectado normalmente entre duas transições, e o outro para representar o número de vagas na fila, conectado de maneira inversa ao primeiro, sendo, dessa forma, um lugar complementar. As transições antes e após uma fila com capacidade limitada podem ser de qualquer tipo: imediatas ou temporais.

Um modelo genérico para a fila com capacidade limitada em GSPN é mostrado na figura 34.

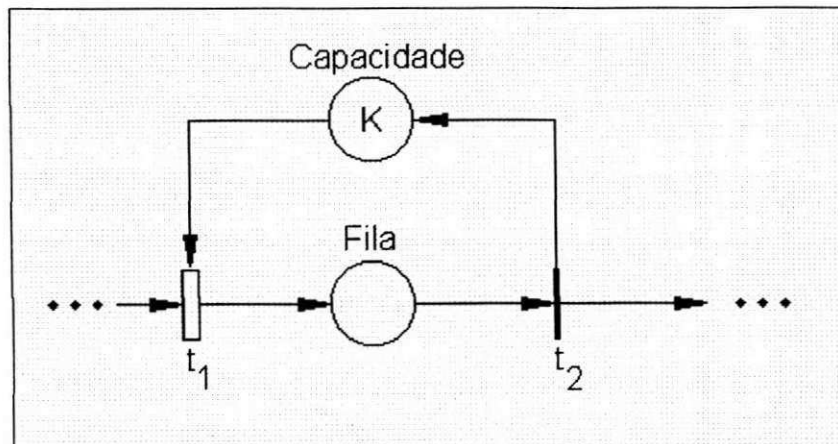


Figura 34 - Fila com capacidade.

## Capítulo 5 - Validação

### 5.1. Introdução

Este capítulo mostra a validação da representação dos elementos do SAVAD em GSPN conforme apresentados no capítulo 4.

Um modelo é construído com os elementos do SAVAD de forma simples: apenas concatenando seus elementos de acordo com as rotas descritas para o modelo. O mesmo se aplica na construção de um modelo equivalente em GSPN. Ou seja, o modelo final é resultante da concatenação dos modelos que representam os elementos do SAVAD em GSPN.

Os passos do procedimento adotado no processo de validação dos modelos neste capítulo são os seguintes:

- descrição sucinta do modelo, mostrando sua representação gráfica, com os elementos de modelagem do SAVAD, e os parâmetros adotados por seus elementos constituintes;
- submissão do modelo ao SAVAD, com opção pela ferramenta ALLOS (soluciona modelos markovianos). Apresentação dos resultados quantitativos obtidos, que correspondem ao vetor de probabilidades associado ao modelo;
- apresentação da cadeia de Markov associada ao modelo<sup>4</sup>;
- apresentação gráfica do modelo de interesse em GSPN;
- submissão do modelo GSPN à ferramenta DNAnet;
- apresentação do grafo de alcançabilidade<sup>5</sup>;
- apresentação da cadeia de Markov associada ao modelo em GSPN<sup>4</sup>;

---

<sup>4</sup> Somente para modelos com reduzido espaço de estados devido à representação da cadeia de Markov ter sido construída manualmente.

<sup>5</sup> Somente para modelos com reduzido espaço de estados devido à representação do grafo de alcançabilidade ter sido construída manualmente.

- Validação dos modelos: através da comparação das cadeias de Markov associadas ao modelo representado como um sistema de redes de filas e aquele representado em GSPN. Observa-se que as cadeias de Markov comparadas são isomórficas, validando a equivalência dos modelos de interesse.
- Finalmente, são apresentados os resultados da análise qualitativa obtida também através da ferramenta DNAnet.

## 5.2. Exemplos

### 5.2.1. Sistema M/M/1/5

#### - Descrição e Representação Gráfica no SAVAD

A figura 35 ilustra o modelo para o sistema M/M/1/5. Esse modelo é constituído por uma fonte, uma estação de serviço, com um único servidor, e um sorvedouro. A capacidade da fila é limitada em 5 fregueses.

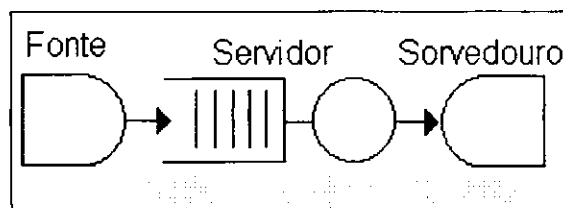


Figura 35 - Modelo do sistema M/M/1/5 no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

#### Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	1,0

#### Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor	Simples	1	5	FCFS	Exponencial	0,5

#### Sorvedouro

Nome
Sorvedouro

Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

Rota

Nome	Classe	Seqüência de Nodos
Rota	Classe	Fonte >> Servidor >> Sorvedouro

- Resultados Quantitativos no SAVAD

Após solucionar o modelo M/M/1/5, ALLOS fornece ao usuário o vetor de probabilidade de estados, conforme apresentado a seguir:

$$P = [0,508805; 0,254056; 0,126896; 0,063102; 0,031485; 0,015656]$$

A cadeia de Markov correspondente ao vetor de probabilidade é apresentada na figura 36.

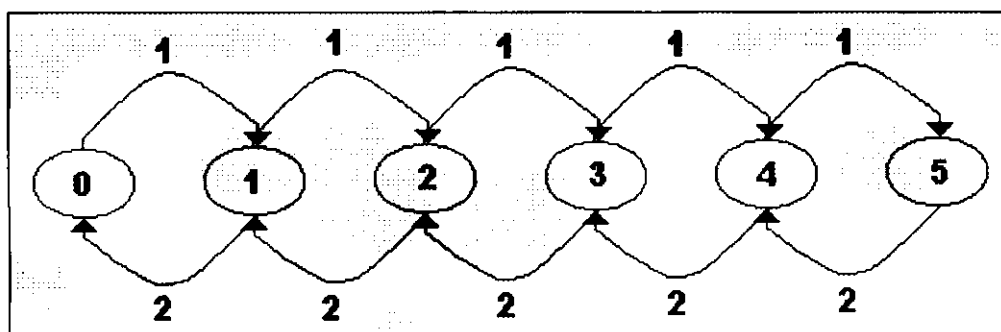


Figura 36 - Cadeia de Markov do sistema M/M/1/5 (SAVAD).

- Representação Gráfica em GSPN

O modelo equivalente em GSPN é mostrado na figura 37.

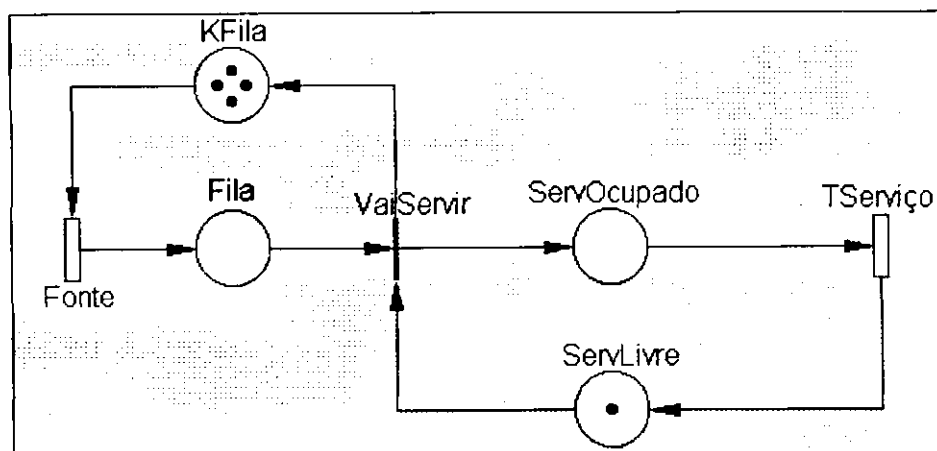


Figura 37 - Modelo do sistema M/M/1/5 em GSPN.



O grafo de alcançabilidade do modelo da figura 37 é apresentado na figura 38, considerando:

- $\lambda$ , a taxa de disparo da transição Fonte,
- $\mu$ , a taxa de disparo da transição Tserviço,
- $t_1$ , a transição VaiServir,
- a distribuição de lugares no vetor de marcação como:
- (Fila, Kfila, ServOcupado, ServLivre).

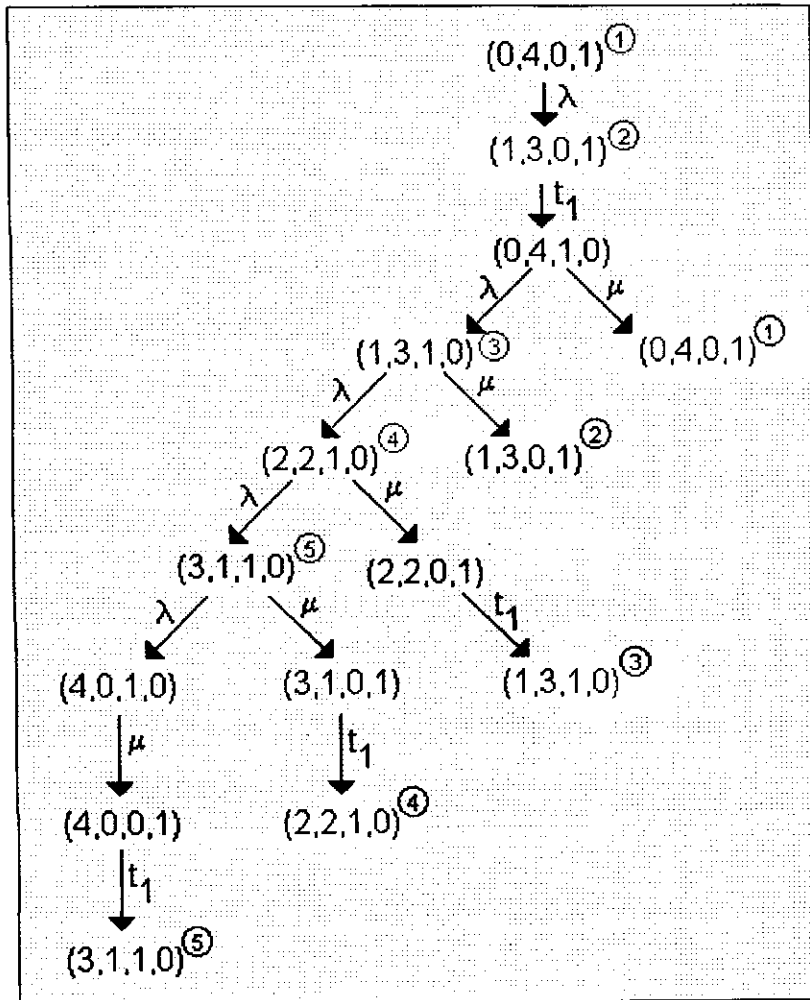


Figura 38 - Grafo de alcançabilidade do modelo M/M/1/5.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

A cadeia de Markov da GSPN modelo é mostrada na figura 39.

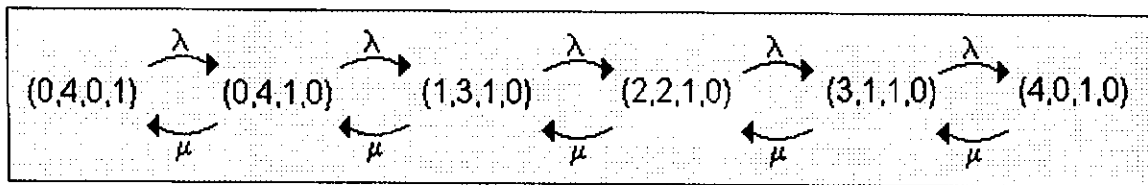


Figura 39 - Cadeia de Markov do modelo M/M/1/5 (GSPN).

**- Comparação das Cadeias de Markov**

Pode-se observar que as cadeias de Markov do modelo da rede M/M/1/5 obtidas através das ferramentas ALLOS e DNAnet são isomórficas, levando aos mesmos resultados, portanto, os modelos são equivalentes.

**- Resultados Qualitativos**

O resultado da análise qualitativa é:

- a rede é viva
- não possui bloqueios (deadlocks)
- é limitada

**5.2.2. Sistema M/M/3/10**

**- Descrição e Representação Gráfica no SAVAD**

A figura 40 representa o modelo para o sistema M/M/3/10. Esse modelo é constituído por uma fonte, uma estação de serviço, com três servidores (servidor múltiplo), e um sorvedouro. A capacidade da fila é limitada em 10 fregueses.

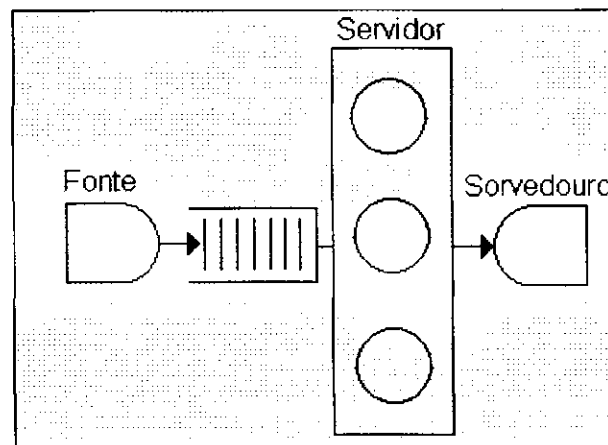


Figura 40 - Modelo do sistema M/M/3/10 no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	1,0

Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor	Múltiplo	3	10	FCFS	Exponencial	0,5

Sorvedouro

Nome
Sorvedouro

Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota	Classe	Fonte >> Servidor >> Sorvedouro

**- Resultados Quantitativos no SAVAD**

O vetor de probabilidade de estados para o modelo do sistema M/M/3/10, obtido utilizando ALLOS, é apresentado a seguir:

- P[0] = 0,0607253                  P[1] = 0,302474                  P[2] = 0,075313
- P[3] = 0,012491                  P[4] = 0,002064                  P[5] = 0,000339
- P[6] = 0,000055                  P[7] = 0,000009                  P[8] = 0,000001
- P[9] = 0,000000

A cadeia de Markov correspondente ao vetor de probabilidade é exibida na figura 41.

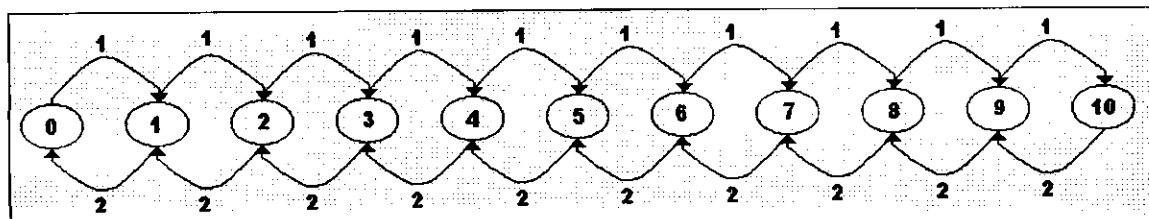


Figura 41 - Cadeia de Markov do sistema M/M/3/10 (SAVAD).

**- Representação Gráfica em GSPN**

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 42.

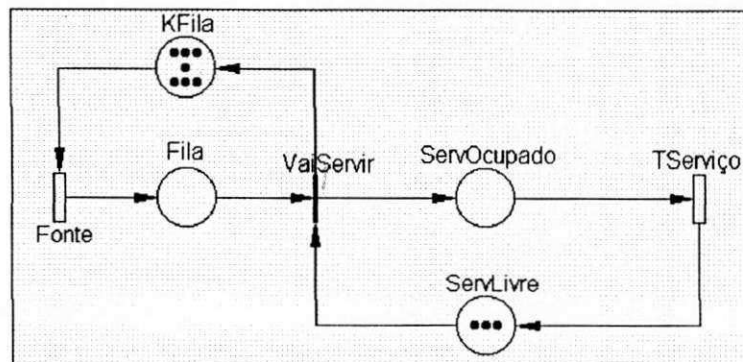


Figura 42 - Modelo para o sistema M/M/3/10 em GSPN.

O grafo de alcançabilidade do modelo é exibido graficamente na figura 43, considerando:

- $\lambda$ , a taxa de disparo da transição Fonte,
- $\mu$ , a taxa de disparo da transição Tserviço,
- $t_1$ , como a transição VaiServir,
- a distribuição de lugares no vetor de marcação como:
- (Fila, Kfila, ServOcupado, ServLivre).

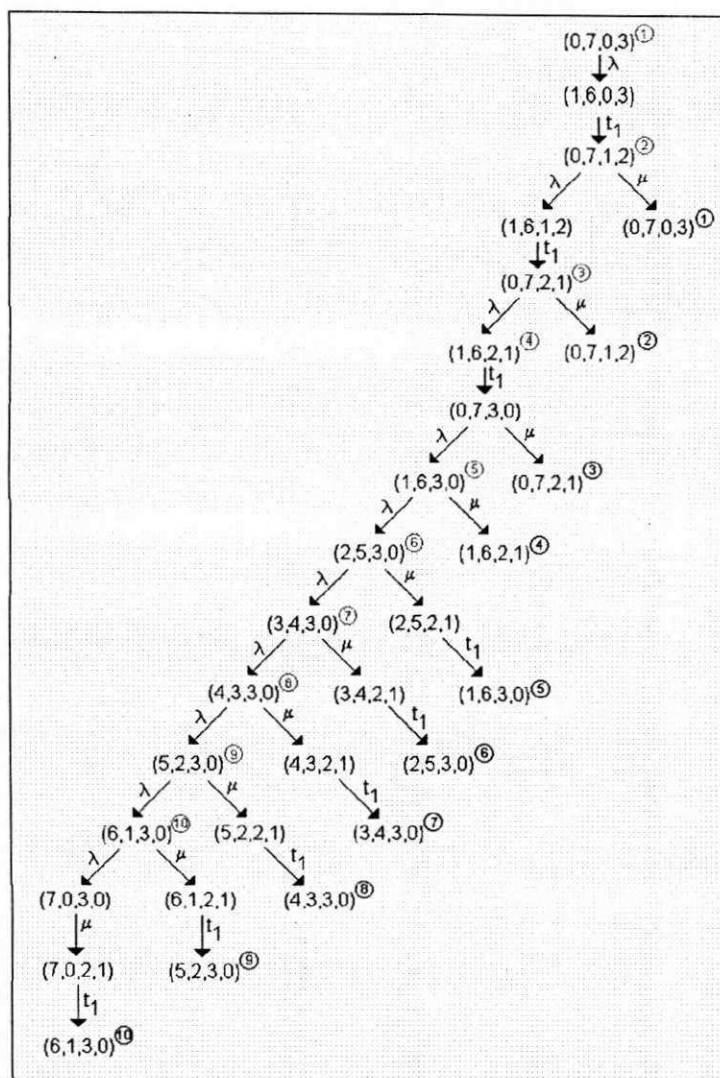


Figura 43 - Grafo de alcançabilidade do sistema M/M/3/10.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

A cadeia de Markov da GSPN modelo é exibida na figura 44.

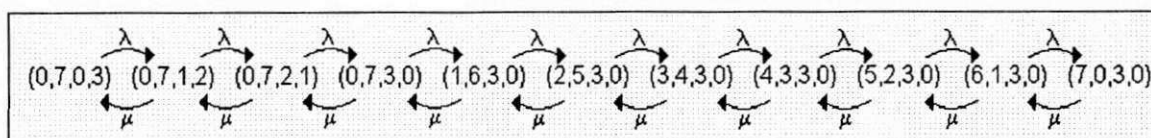


Figura 44 - Cadeia de Markov do sistema M/M/3/10 (GSPN).

**- Comparação das Cadeias de Markov**

Sendo a cadeia de Markov deste modelo em GSPN isomórfica àquela do modelo no SAVAD, então os modelos são equivalentes.

**- Resultados Qualitativos**

Os resultados da análise qualitativa do modelo GSPN são os seguintes:

- a rede é viva

- não possui bloqueios (deadlocks)
- é limitada

### 5.2.3. Modelo de uma Rede Aberta sem Realimentação

#### - Descrição e Representação Gráfica no SAVAD

O modelo apresentado na figura 45 exibe o modelo de uma rede aberta sem realimentação. Esse modelo é constituído por uma fonte, duas estações de serviço conectadas em série (a primeira com um servidor e a segunda com dois) e por um sorvedouro.

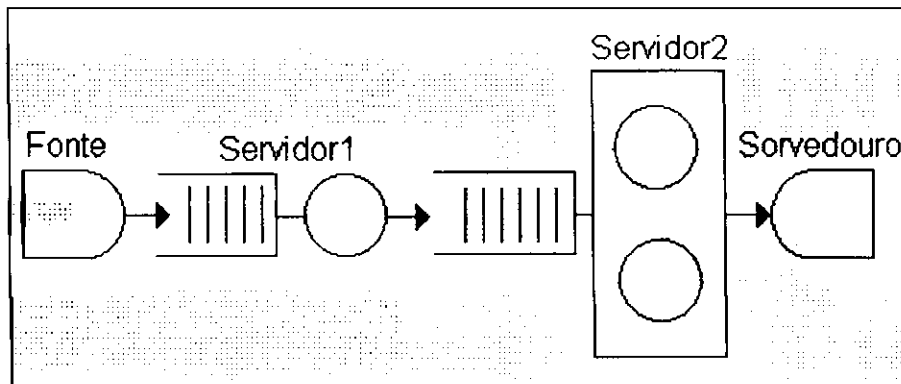


Figura 45 – Modelo de uma rede aberta sem realimentação no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

#### Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	0,5

#### Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor1	Simple	1	4	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor2	Múltiplo	2	3	FCFS	Exponencial	1,0

#### Sorvedouro

Nome
Sorvedouro

#### Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

#### Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota	Classe	Fonte >> Servidor1 >> Servidor2 >> Sorvedouro

**- Resultados Quantitativos no SAVAD**

O vetor de probabilidades de estados para o modelo de uma rede aberta sem realimentação, obtido utilizando ALLOS, é o seguinte:

$P[0,0] = 0,015665$	$P[1,0] = 0,017275$	$P[2,0] = 0,021761$	$P[3,0] = 0,031008$
$P[1,1] = 0,037470$	$P[3,0] = 0,032005$	$P[2,1] = 0,052267$	$P[0,2] = 0,028998$
$P[4,0] = 0,083122$	$P[1,2] = 0,040703$	$P[3,1] = 0,084410$	$P[2,2] = 0,061093$
$P[0,3] = 0,020380$	$P[4,1] = 0,102441$	$P[1,3] = 0,040747$	$P[3,2] = 0,075708$
$P[2,3] = 0,058187$	$P[4,2] = 0,069495$	$P[3,3] = 0,063752$	$P[4,3] = 0,063513$

**- Representação Gráfica em GSPN**

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 46.

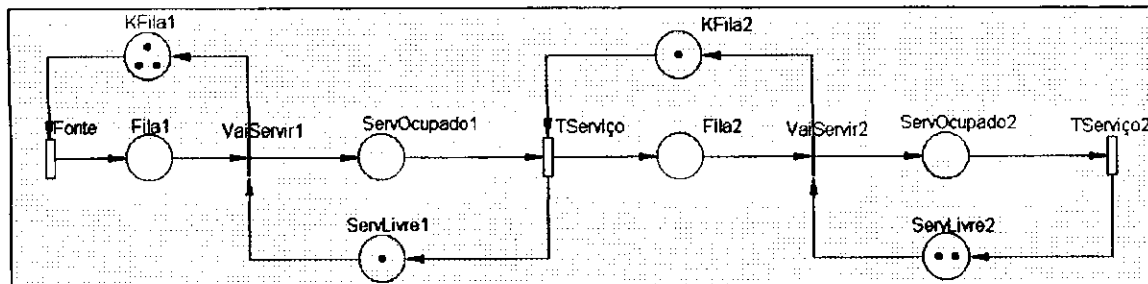


Figura 46 - Modelo de uma rede aberta sem realimentação em GSPN.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

Os lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(Fila1, KFila1, ServOcupado1, ServLivre1, Fila2, KFila2, ServOcupado2, ServLivre2)

Os estados tangíveis do modelo, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov do modelo são os seguintes:

03010102	03100102	03010111	03100111
03010120	03100120	03011020	03101020
12101020	21101020	21100120	21100111
21100102	30100102	30100111	30100120
30101020	12100120	12100111	12100102

**- Comparação das Cadeias de Markov**

O número de estados (20) é exatamente igual ao número de estados descritos no vetor de probabilidades da cadeia de Markov do modelo descrito para ALLOS. Além do que, os estados são iguais e as transições entre estados ocorrem da mesma maneira, levando a modelos equivalentes.

### - Resultados Qualitativos

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- A rede é limitada,
- a rede é viva,
- não é possível haver bloqueios (deadlocks),

### 5.2.4. Modelo de uma Rede Fechada

#### - Descrição e Representação Gráfica no SAVAD

O modelo apresentado na figura 47 exibe um modelo de uma rede fechada. Esse modelo é constituído por duas estações de serviço simples conectadas em série, uma realimentando a outra. No modelo existe um número fixo de fregueses circulando (população).

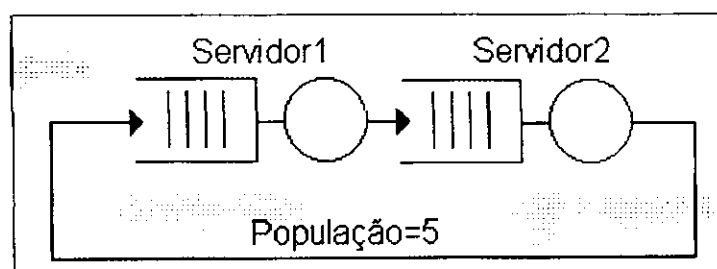


Figura 47 - Modelo de uma rede fechada no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

#### Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor1	Simple	1	Ilimitada	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor2	Simple	1	Ilimitada	FCFS	Exponencial	1,0

#### Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)



Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota	Classe	Servidor1 >> Servidor2 >> Servidor1

**- Resultados Quantitativos no SAVAD**

O vetor de probabilidades de estados para o modelo de uma rede aberta sem realimentação, obtido utilizando ALLOS, é o seguinte:

$$\begin{array}{lll}
 P[5,0] = 0,167552 & P[4,1] = 0,167401 & P[3,2] = 0,166817 \\
 P[2,3] = 0,166517 & P[1,4] = 0,165932 & P[0,5] = 0,165782
 \end{array}$$

**- Representação Gráfica em GSPN**

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 48.

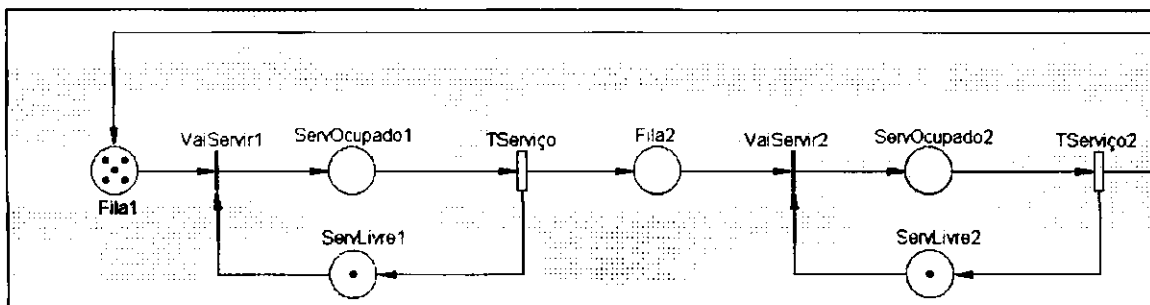


Figura 48 - Modelo de uma rede fechada em GSPN.

O grafo de alcançabilidade deste modelo é mostrado graficamente na figura 49, considerando o seguinte:

- $t_1$  é o disparo da transição VaiServir1,
- $\mu_1$  é a taxa de disparo de Servidor1,
- $t_2$  é o disparo da transição VaiServir2,
- $\mu_2$  é a taxa de disparo de Servidor2,
- a distribuição de lugares no vetor de marcações é:
- (Fila1, K Fila1, ServOcupado1, ServLivre1, Fila2, K Fila2, ServOcupado2, ServLivre2)

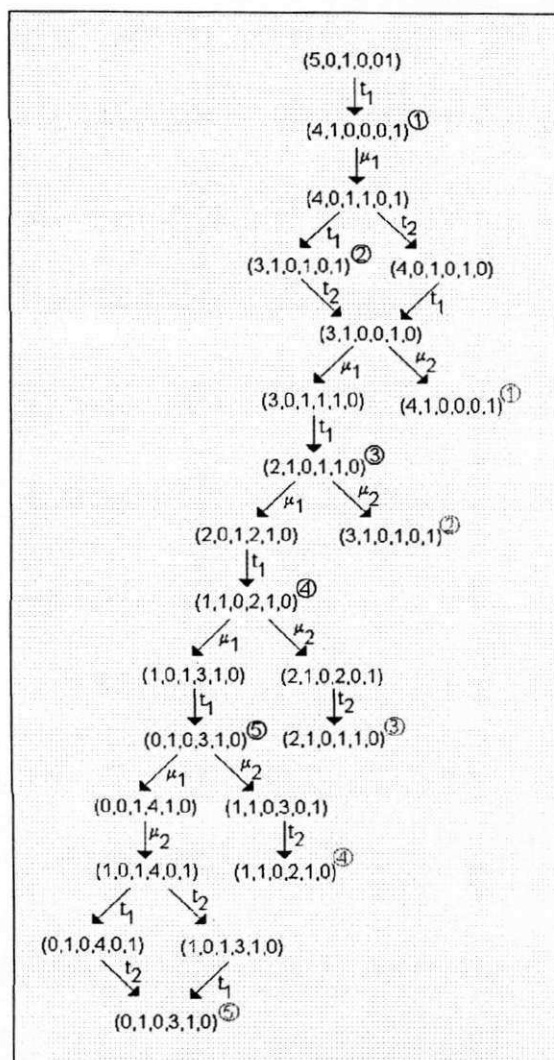


Figura 49 - Grafo de alcançabilidade do modelo de uma rede fechada.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

Dessa forma, os estados tangíveis, que formam a cadeia de Markov do modelo são exibidos na figura 50.

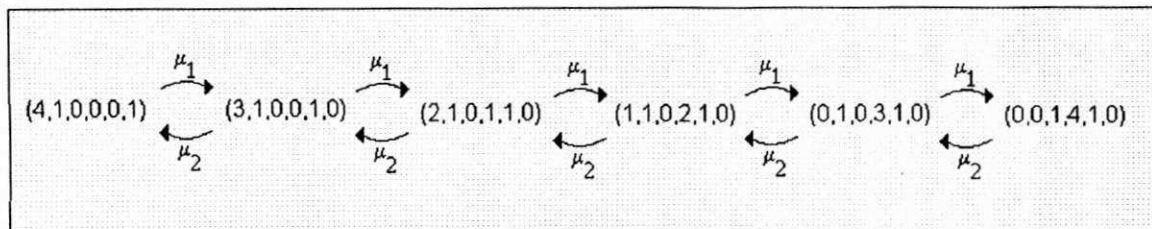


Figura 50 - Cadeia de Markov do modelo de uma rede fechada (GSPN).

**- Comparação das Cadeias de Markov**

Sendo esta cadeia de Markov isomórfica à cadeia de Markov do mesmo modelo solucionados por ALLOS, então os modelos são equivalentes.

**- Resultados Qualitativos**

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- A rede é limitada,
- a rede é viva,
- não é possível haver bloqueios (deadlocks),

**5.2.5. Modelo de uma Rede Aberta com Ponto de Multiplicação**

**- Descrição e Representação Gráfica no SAVAD**

A figura 51 exibe o modelo de uma rede aberta com ponto de multiplicação com os elementos do SAVAD.

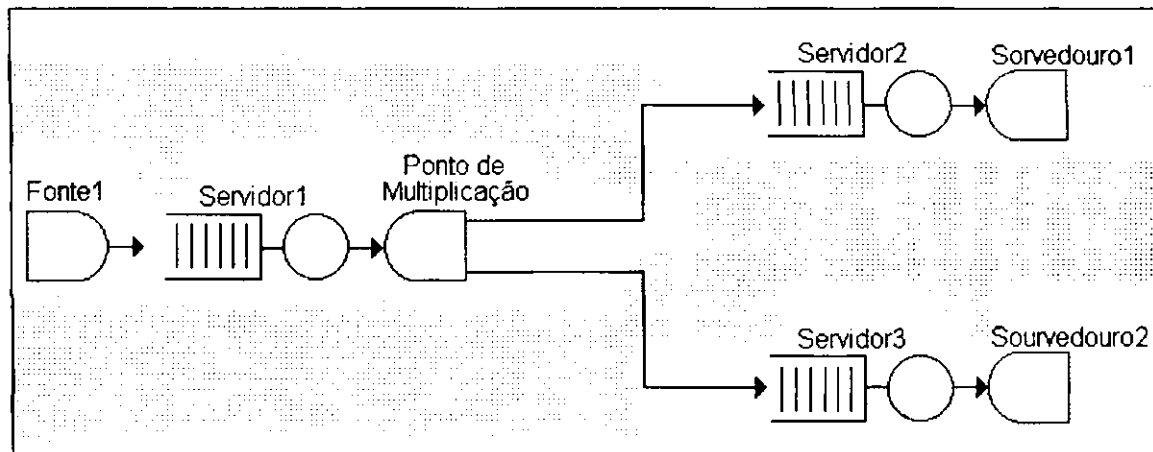


Figura 51 - Modelo de uma rede aberta com ponto de multiplicação no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	0,5

Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor1	Simples	1	4	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor2	Simples	1	3	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor3	Simples	1	3	FCFS	Exponencial	0,5

Sorvedouro

Nome
Sorvedouro1
Sorvedouro2

Ponto de Multiplicação

Nome	Saídas
PontoDeMultiplicação	2

Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

Rota

Nome	Classe	Sequência de Nós
Rota1	Classe	Fonte >> Servidor1 >> PontoDeMultiplicação >> Servidor2 >> Sorvedouro1
Rota2	Classe	Fonte >> Servidor1 >> PontoDeMultiplicação >> Servidor3 >> Sorvedouro2

- Resultados Quantitativos no SAVAD

O vetor de probabilidades de estados do modelo de uma rede aberta com ponto de multiplicação, obtido utilizando ALLOS, é apresentado a seguir:

$P\{0,0,0\} = 0.000000$	$P\{1,0,0\} = 0.009307$	$P\{2,0,0\} = 0.016624$	$P\{0,1,1\} = 0.007309$
$P\{1,1,1\} = 0.010422$	$P\{0,0,1\} = 0.011467$	$P\{0,1,0\} = 0.011467$	$P\{3,0,0\} = 0.029193$
$P\{1,0,1\} = 0.009243$	$P\{1,1,0\} = 0.009243$	$P\{2,1,1\} = 0.017163$	$P\{0,2,2\} = 0.006207$
$P\{4,0,0\} = 0.094576$	$P\{2,0,1\} = 0.011900$	$P\{0,1,2\} = 0.006263$	$P\{2,1,0\} = 0.011900$
$P\{0,2,1\} = 0.006263$	$P\{1,2,2\} = 0.010116$	$P\{3,1,1\} = 0.037502$	$P\{1,1,2\} = 0.008836$
$P\{0,0,2\} = 0.003975$	$P\{3,0,1\} = 0.020849$	$P\{1,2,1\} = 0.008836$	$P\{0,2,0\} = 0.003975$
$P\{3,1,0\} = 0.020849$	$P\{2,2,2\} = 0.017717$	$P\{0,3,3\} = 0.003375$	$P\{4,1,1\} = 0.021092$
$P\{1,0,2\} = 0.005728$	$P\{2,1,2\} = 0.014499$	$P\{0,2,3\} = 0.004076$	$P\{4,0,1\} = 0.032790$
$P\{1,2,0\} = 0.005728$	$P\{2,2,1\} = 0.014499$	$P\{0,3,2\} = 0.004076$	$P\{4,1,0\} = 0.032790$
$P\{1,3,3\} = 0.007028$	$P\{3,2,2\} = 0.014685$	$P\{2,0,2\} = 0.009236$	$P\{0,1,3\} = 0.003275$
$P\{1,2,3\} = 0.008536$	$P\{3,1,2\} = 0.019169$	$P\{2,2,0\} = 0.009236$	$P\{0,3,1\} = 0.003275$
$P\{1,3,2\} = 0.008536$	$P\{3,2,1\} = 0.019169$	$P\{2,3,3\} = 0.007232$	$P\{4,2,2\} = 0.009109$
$P\{1,1,3\} = 0.007020$	$P\{0,0,3\} = 0.001643$	$P\{3,0,2\} = 0.013159$	$P\{2,2,3\} = 0.011637$
$P\{4,1,2\} = 0.012918$	$P\{1,3,1\} = 0.007020$	$P\{0,3,0\} = 0.001643$	$P\{3,2,0\} = 0.013159$
$P\{2,3,2\} = 0.011637$	$P\{4,2,1\} = 0.012918$	$P\{3,3,3\} = 0.005441$	$P\{1,0,3\} = 0.004339$
$P\{2,1,3\} = 0.010600$	$P\{4,0,2\} = 0.023743$	$P\{3,2,3\} = 0.009987$	$P\{1,3,0\} = 0.004339$
$P\{2,3,1\} = 0.010600$	$P\{4,2,0\} = 0.023743$	$P\{3,3,2\} = 0.009987$	$P\{4,3,3\} = 0.002715$
$P\{2,0,3\} = 0.007469$	$P\{3,1,3\} = 0.014758$	$P\{4,2,3\} = 0.006338$	$P\{2,3,0\} = 0.007469$
$P\{3,3,1\} = 0.014758$	$P\{4,3,2\} = 0.006338$	$P\{3,0,3\} = 0.011098$	$P\{4,1,3\} = 0.010525$
$P\{3,3,0\} = 0.011098$	$P\{4,3,1\} = 0.010525$	$P\{4,0,3\} = 0.021516$	$P\{4,3,0\} = 0.021516$

- Representação Gráfica em GSPN

A rede em GSPN equivalente a este modelo está descrita na figura 52.

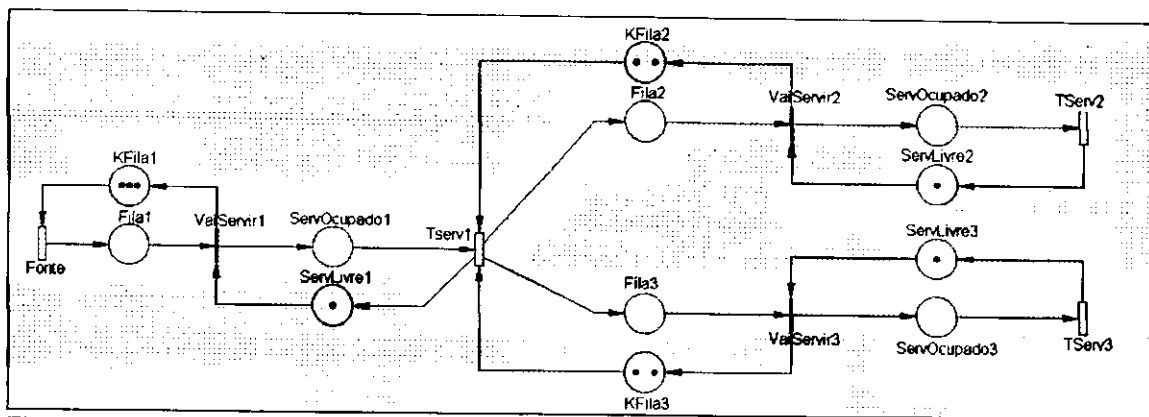


Figura 52 – Modelo de uma rede aberta com ponto de multiplicação em GSPN.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

Os lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(Kfila1, Fila1, ServOcupado1, ServLivre1, Kfila2, Fila2, ServOcupado2, ServLivre2, Kfila3, Fila3, ServOcupado3, ServLivre3)

Os estados tangíveis, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov do modelo são os seguintes:

030102010201	031002010201	030102010210
030102011110	030102012010	030102100201
030102100210	030102101110	030102102010
030111100201	030111100210	030111101110
030111102010	030120100201	030120100210
030120101110	030120102010	031002010210
031002011110	031002012010	031002100201
031002100210	031002101110	031002102010
031011100201	031011100210	031011101110
031011102010	031020100201	031020100210
031020101110	031020102010	121002010201
121002010210	121002011110	121002012010
121002100201	121002100210	121002101110
121002102010	121011100201	121011100210
121011101110	121011102010	121020100201
121020100210	121020101110	121020102010
211002010201	211002010210	211002011110
211002012010	211002100201	211002100210
211002101110	211002102010	211011100201
211011100210	211011101110	211011102010
211020100201	211020100210	211020101110
211020102010	301002010201	301002010210
301002011110	301002012010	301002100201
301002100210	301002101110	301002102010
301011100201	301011100210	301011101110
301011102010	301020100201	301020100210
301020101110	301020102010	

**- Comparação das Cadeias de Markov**

O número de estados (80) tangíveis é igual ao número de estados do vetor de probabilidades obtido por ALLOS, sendo os estados em si e as mudanças entre eles também iguais, então os modelos são equivalentes.

**- Resultados Qualitativos**

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- a rede é limitada,
- a rede é viva,
- não é possível haver bloqueios (deadlocks),

**5.2.6. Modelo de uma Rede Aberta com Ponto de Fusão**

**- Descrição e Representação Gráfica no SAVAD**

Para ilustrar o uso do elemento de modelagem ponto de fusão escolheu-se um modelo de rede duas fontes, três estações de serviço, um ponto de fusão e um sorvedouro. Esse modelo é exibido na figura 53.

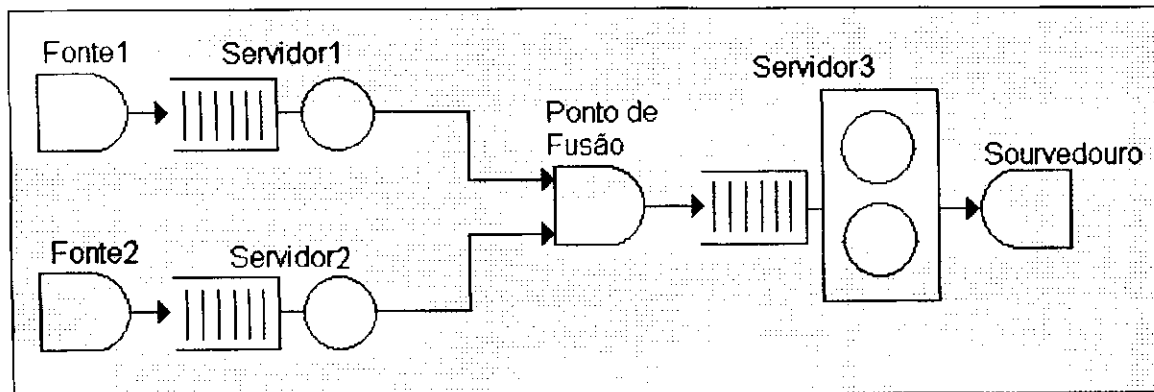


Figura 53 – Modelo de uma rede aberta com ponto de fusão no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte1	Exponencial	0,5
Fonte2	Exponencial	0,25

## Capítulo 5 - Validação

### Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor1	Simple	1	4	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor2	Múltiplo	2	3	FCFS	Exponencial	0,5
Servidor3	Simple	1	4	FCFS	Exponencial	0,5

### Ponto de Multiplicação

Nome	Entradas
PontoDeFusão	2

### Sorvedouro

Nome
Sorvedouro1

### Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

### Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota1	Classe	Fonte1 >> Servidor1 >> PontoDeFusão >> Servidor3 >> Sorvedouro
Rota2	Classe	Fonte >> Servidor2 >> PontoDeFusão

## - Resultados Quantitativos no SAVAD

O vetor de probabilidades para o modelo de rede aberta com ponto de fusão é mostrado a seguir:

$P\{0,0,0\} = 0.000000$	$P\{1,0,0\} = 0.000034$	$P\{0,0,1\} = 0.000102$	$P\{1,0,1\} = 0.000143$
$P\{0,0,2\} = 0.000425$	$P\{2,0,0\} = 0.000045$	$P\{1,0,2\} = 0.000527$	$P\{0,0,3\} = 0.001685$
$P\{2,0,1\} = 0.000157$	$P\{0,1,0\} = 0.000153$	$P\{3,0,0\} = 0.000042$	$P\{1,0,3\} = 0.001970$
$P\{0,0,4\} = 0.013764$	$P\{2,0,2\} = 0.000725$	$P\{0,1,1\} = 0.000609$	$P\{1,1,0\} = 0.000206$
$P\{3,0,1\} = 0.000137$	$P\{4,0,0\} = 0.000047$	$P\{1,0,4\} = 0.014974$	$P\{2,0,3\} = 0.002689$
$P\{0,1,2\} = 0.002140$	$P\{1,1,1\} = 0.000803$	$P\{3,0,2\} = 0.000671$	$P\{2,1,0\} = 0.000199$
$P\{4,0,1\} = 0.000136$	$P\{2,0,4\} = 0.018505$	$P\{0,1,3\} = 0.008360$	$P\{1,1,2\} = 0.002786$
$P\{3,0,3\} = 0.004562$	$P\{2,1,1\} = 0.000789$	$P\{0,2,0\} = 0.000318$	$P\{4,0,2\} = 0.000615$
$P\{3,1,0\} = 0.000161$	$P\{1,1,3\} = 0.010246$	$P\{0,1,4\} = 0.020284$	$P\{3,0,4\} = 0.026827$
$P\{2,1,2\} = 0.004120$	$P\{0,2,1\} = 0.001295$	$P\{4,0,3\} = 0.003944$	$P\{1,2,0\} = 0.000411$
$P\{3,1,1\} = 0.000615$	$P\{4,1,0\} = 0.000104$	$P\{1,1,4\} = 0.024011$	$P\{2,1,3\} = 0.014654$
$P\{0,2,2\} = 0.004286$	$P\{4,0,4\} = 0.078377$	$P\{1,2,1\} = 0.001869$	$P\{3,1,2\} = 0.003377$
$P\{2,2,0\} = 0.000355$	$P\{4,1,1\} = 0.000357$	$P\{2,1,4\} = 0.032936$	$P\{0,2,3\} = 0.009894$
$P\{1,2,2\} = 0.006093$	$P\{3,1,3\} = 0.028442$	$P\{2,2,1\} = 0.001681$	$P\{0,3,0\} = 0.000467$
$P\{4,1,2\} = 0.001809$	$P\{3,2,0\} = 0.000229$	$P\{1,2,3\} = 0.013581$	$P\{0,2,4\} = 0.013419$
$P\{3,1,4\} = 0.051877$	$P\{2,2,2\} = 0.009621$	$P\{0,3,1\} = 0.001758$	$P\{4,1,3\} = 0.012100$
$P\{1,3,0\} = 0.000537$	$P\{3,2,1\} = 0.001044$	$P\{4,2,0\} = 0.000099$	$P\{1,2,4\} = 0.018998$
$P\{2,2,3\} = 0.020594$	$P\{0,3,2\} = 0.004278$	$P\{4,1,4\} = 0.087663$	$P\{1,3,1\} = 0.003112$
$P\{3,2,2\} = 0.005912$	$P\{2,3,0\} = 0.000395$	$P\{4,2,1\} = 0.000428$	$P\{2,2,4\} = 0.028873$
$P\{0,3,3\} = 0.006898$	$P\{1,3,2\} = 0.007773$	$P\{3,2,3\} = 0.028268$	$P\{2,3,1\} = 0.002452$
$P\{4,2,2\} = 0.002248$	$P\{3,3,0\} = 0.000205$	$P\{1,3,3\} = 0.012832$	$P\{0,3,4\} = 0.006919$
$P\{3,2,4\} = 0.039926$	$P\{2,3,2\} = 0.010227$	$P\{4,2,3\} = 0.010328$	$P\{3,3,1\} = 0.001276$
$P\{4,3,0\} = 0.000068$	$P\{1,3,4\} = 0.016310$	$P\{2,3,3\} = 0.018290$	$P\{4,2,4\} = 0.055796$
$P\{3,3,2\} = 0.005771$	$P\{4,3,1\} = 0.000470$	$P\{2,3,4\} = 0.026424$	$P\{3,3,3\} = 0.021377$
$P\{4,3,2\} = 0.002234$	$P\{3,3,4\} = 0.034509$	$P\{4,3,3\} = 0.008598$	$P\{4,3,4\} = 0.051351$

- Representação Gráfica em GSPN

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 54.

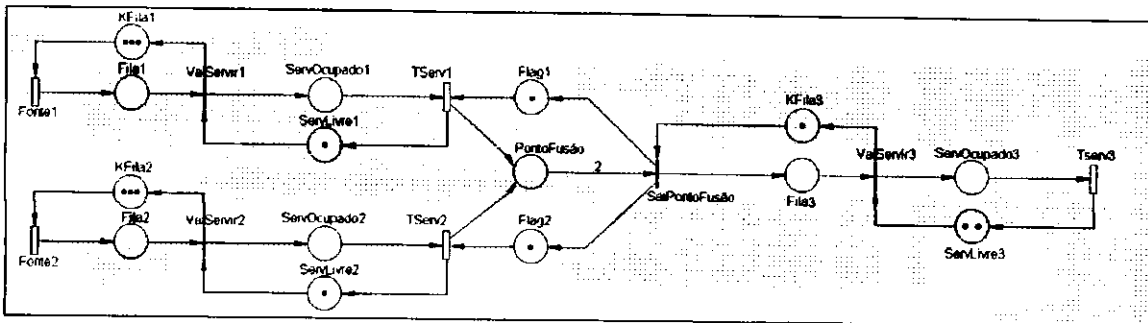


Figura 54 – Modelo de uma rede aberta com ponto de fusão em GSPN.

- Resultados Quantitativos em GSPN

Os lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(Fila1, Fila2, KFila2, KFila1, ServOcupado1, ServLivre1, ServOcupado2, ServLivre2, Fila3, KFila3, ServOcupado3, ServLivre3, PontoFusão, Flag2, Flag1)

Os estados tangíveis, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov do modelo, são os seguintes:

003301010102011	003301100102011
003301010102101	003301010102110
003301010102200	003301100102101
003301100102110	003301100102200
003310010102011	003310010102101
003310010102110	003310010102200
003310100102011	003310100102101
003310100102110	003310100102200
012301100102011	012301100102101
012301100102110	012301100102200
012310100102011	012310100102101
012310100102110	012310100102200
021301100102011	021301100102101
021301100102110	021301100102200
021310100102011	021310100102101
021310100102110	021310100102200
030301100102011	030301100102101
030301100102110	030301100102200
030310100102011	030310100102101
030310100102110	030310100102200
103210010102011	103210010102101
103210010102110	103210010102200
103210100102011	103210100102101
103210100102110	103210100102200



112210100102011	112210100102101
112210100102110	112210100102200
121210100102011	121210100102101
121210100102110	121210100102200
130210100102011	130210100102101
130210100102110	130210100102200
203110010102011	203110010102101
203110010102110	203110010102200
203110100102011	203110100102101
203110100102110	203110100102200
212110100102011	212110100102101
212110100102110	212110100102200
221110100102011	221110100102101
221110100102110	221110100102200
230110100102011	230110100102101
230110100102110	230110100102200
303010010102011	303010010102101
303010010102110	303010010102200
303010100102011	303010100102101
303010100102110	303010100102200
312010100102011	312010100102101
312010100102110	312010100102200
321010100102011	321010100102101
321010100102110	321010100102200
330010100102011	330010100102101
330010100102110	330010100102200

### - Comparação das Cadeias de Markov

O número de estados (100) e as transições entre estados desta cadeia de Markov são exatamente iguais aos da cadeia de Markov do modelo solucionado por ALLOS. Os estados são os mesmos do vetor de probabilidades utilizado por ALLOS. Portanto, os modelos apresentados em ambos os paradigmas são equivalentes.

### - Resultados Qualitativos

O resultado da análise qualitativa para este modelo é o seguinte:

- a rede é limitada
- não há a possibilidade de bloqueio
- a rede é viva

### 5.2.7. Modelo de um Protocolo de Sessão com Diálogo Semi-Duplex

#### - Descrição e Representação Gráfica no SAVAD

A figura 55 exibe o modelo de um protocolo de sessão com diálogo semi-duplex.

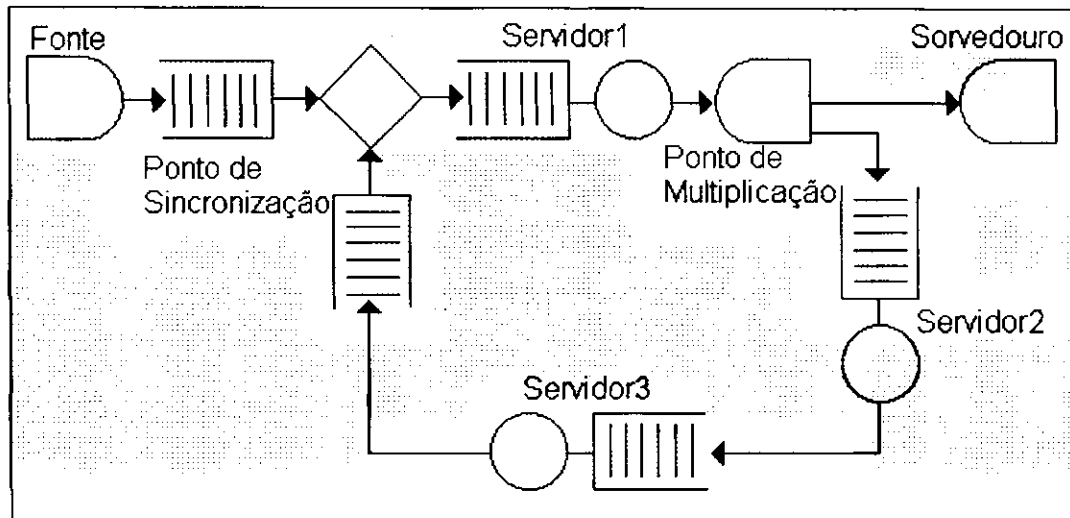


Figura 55 - Modelo de um protocolo de sessão com diálogo semi-duplex no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

#### Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	0,08333

#### Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor1	Simple	1	6	FCFS	Exponencial	0,1
Servidor2	Múltiplo	2	6	FCFS	Exponencial	0,05
Servidor3	Simple	1	6	FCFS	Exponencial	0,1

#### Ponto de Sincronização

Nome	Nº de Filas	Comprimento de Fila (K)	Associação
PontoDeSincronização	2	6	1:1

#### Ponto de Multiplicação

Nome	Nº de Saídas
PontoDeMultiplicação	2

Sorvedouro

<b>Nome</b>
Sorvedouro

Classe

<b>Nome</b>	<b>Prioridade</b>
Classe	0 (sem prioridade)

Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota1	Classe	Fonte >> PontoDeSincronização1 >> Servidor1 >> PontoDeMultiplicação >> Sorvedouro
Rota2	Classe	PontoDeSincronização2 >> Servidor1 >> PontoDeMultiplicação >> Servidor2 >> Servidor3 >> PontoDeSincronização2

**- Resultados Quantitativos no SAVAD**

O vetor de probabilidades de estados para o modelo de protocolo de sessão com diálogo semi-duplex, utilizando ALLOS, é o seguinte:

$P\{0,2,0,0,0\} = 0.000310$	$P\{0,1,1,0,0\} = 0.000499$	$P\{0,0,2,0,0\} = 0.001029$	$P\{0,1,0,1,0\} = 0.000238$
$P\{1,0,2,0,0\} = 0.002422$	$P\{0,0,1,1,0\} = 0.000477$	$P\{0,1,0,0,1\} = 0.000335$	$P\{1,0,1,1,0\} = 0.001118$
$P\{0,0,1,0,1\} = 0.000674$	$P\{0,0,0,2,0\} = 0.000153$	$P\{2,0,2,0,0\} = 0.006178$	$P\{1,0,0,2,0\} = 0.000414$
$P\{0,0,0,1,1\} = 0.000238$	$P\{1,0,1,0,1\} = 0.001588$	$P\{2,0,1,1,0\} = 0.002836$	$P\{3,0,2,0,0\} = 0.016630$
$P\{1,0,0,1,1\} = 0.000653$	$P\{0,0,0,0,2\} = 0.000226$	$P\{2,0,0,2,0\} = 0.001051$	$P\{2,0,1,0,1\} = 0.003984$
$P\{3,0,1,1,0\} = 0.007618$	$P\{4,0,2,0,0\} = 0.050216$	$P\{1,0,0,0,2\} = 0.000742$	$P\{2,0,0,1,1\} = 0.001650$
$P\{3,0,0,2,0\} = 0.002785$	$P\{3,0,1,0,1\} = 0.010555$	$P\{4,0,1,1,0\} = 0.021796$	$P\{5,0,2,0,0\} = 0.072138$
$P\{2,0,0,0,2\} = 0.001946$	$P\{3,0,0,1,1\} = 0.004326$	$P\{4,0,0,2,0\} = 0.007859$	$P\{4,0,1,0,1\} = 0.029067$
$P\{5,0,1,1,0\} = 0.039223$	$P\{6,0,2,0,0\} = 0.086309$	$P\{3,0,0,0,2\} = 0.005050$	$P\{4,0,0,1,1\} = 0.011908$
$P\{5,0,0,2,0\} = 0.015196$	$P\{5,0,1,0,1\} = 0.090555$	$P\{6,0,1,1,0\} = 0.044415$	$P\{4,0,0,0,2\} = 0.013632$
$P\{5,0,0,1,1\} = 0.032187$	$P\{6,0,0,2,0\} = 0.031279$	$P\{6,0,1,0,1\} = 0.098607$	$P\{5,0,0,0,2\} = 0.036705$
	$P\{6,0,0,1,1\} = 0.066533$	$P\{6,0,0,0,2\} = 0.176647$	

**- Representação Gráfica em GSPN**

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 56.

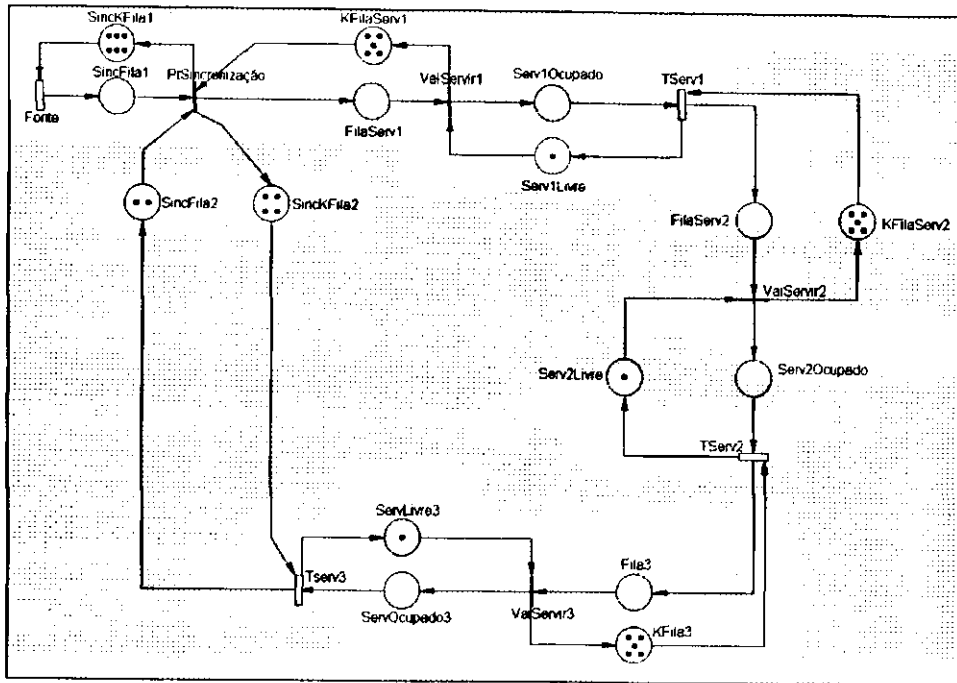


Figura 56 - Modelo de um protocolo de sessão com diálogo semi-duplex GSPN.

**- Resultados Quantitativos em GSPN**

As lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(SincFila1, SincKFile1, SincFila2, SincKFile2, FileServ1, KFileServ1, Serv1Ocupado, Serv1Livre, KFileServ2, FileServ2, Serv2Ocupado, Serv2Livre, KFileServ3, FileServ3, Serv3Ocupado, Serv3Livre)

Os estados tangíveis do modelo, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov são os seguintes:

- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| 0606050141105001 | 0606050150014110 |
| 0606050150105010 | 0606051050015010 |
| 0606051050105001 | 0606141050015001 |
| 0615050150015010 | 0615050150105001 |
| 0615051050015001 | 0624050150015001 |
| 1506050141105001 | 1506050150014110 |
| 1506050150105010 | 1506051050015010 |
| 1506051050105001 | 1506141050015001 |
| 2406050141105001 | 2406050150014110 |
| 2406050150105010 | 2406051050015010 |
| 2406051050105001 | 2406141050015001 |
| 3306050141105001 | 3306050150014110 |
| 3306050150105010 | 3306051050015010 |
| 3306051050105001 | 3306141050015001 |
| 4206050141105001 | 4206050150014110 |
| 4206050150105010 | 4206051050015010 |
| 4206051050105001 | 4206141050015001 |
| 5106050141105001 | 5106050150014110 |

5 1 0 6 0 5 0 1 5 0 1 0 5 0 1 0  
 5 1 0 6 0 5 1 0 5 0 1 0 5 0 0 1  
 6 0 0 6 0 5 0 1 4 1 1 0 5 0 0 1  
 6 0 0 6 0 5 0 1 5 0 1 0 5 0 1 0  
 6 0 0 6 0 5 1 0 5 0 1 0 5 0 0 1

5 1 0 6 0 5 1 0 5 0 0 1 5 0 1 0  
 5 1 0 6 1 4 1 0 5 0 0 1 5 0 0 1  
 6 0 0 6 0 5 0 1 5 0 0 1 4 1 1 0  
 6 0 0 6 0 5 1 0 5 0 0 1 5 0 1 0  
 6 0 0 6 1 4 1 0 5 0 0 1 5 0 0 1

**- Comparação das Cadeias de Markov**

O número de estados (46) é exatamente igual ao número de estados descritos no vetor de probabilidades utilizado por ALLOS para solucionar o modelo. Além disso, os estados em si e as transições entre estados das duas cadeias de Markov são as mesmas, o que leva a modelos equivalentes.

**- Resultados Qualitativos**

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- a rede é limitada,
- a rede é viva,
- não há a possibilidade de bloqueios (deadlocks),

**5.2.8. Modelo de um Protocolo de Sessão com Quarentena de Dados e Modo de Diálogo Duplex**

**- Descrição e Representação Gráfica no SAVAD**

A figura 57 apresenta o modelo de um protocolo de sessão com quarentena de dados e modo de diálogo duplex.

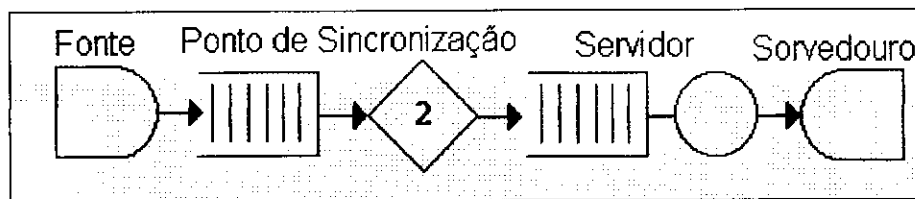


Figura 57 - Modelo de um protocolo de sessão com quarentena de dados no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte	Exponencial	0,08333

Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor	Simplex	1	6	FCFS	Exponencial	0,1

Ponto de Sincronização

Nome	Nº de Filas	Comprimento de Fila (K)	Associação
PontoDeSincronização	1	6	2:2

Sorvedouro

Nome
Sorvedouro

Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)

Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota1	Classe	Fonte >> PontoDeSincronização >> Servidor >> Sorvedouro

- Resultados Quantitativos no SAVAD

O vetor de probabilidades de estados para o modelo de protocolo de sessão com quarentena de dados e modo de diálogo duplex, obtido utilizando o ALLOS, é o seguinte:

$P[0,0]= 0.007797$	$P[1,0]= 0.020666$	$P[0,2]= 0.020534$	$P[1,2]= 0.022574$
$P[0,1]= 0.009335$	$P[1,1]= 0.015356$	$P[0,4]= 0.026103$	$P[0,3]= 0.020285$
$P[1,4]= 0.030610$	$P[1,3]= 0.025040$	$P[0,6]= 0.036833$	$P[0,5]= 0.030367$
$P[1,6]= 0.042625$	$P[1,5]= 0.035901$	$P[2,6]= 0.053936$	$P[2,5]= 0.044144$
$P[3,6]= 0.056245$	$P[3,5]= 0.049699$	$P[4,6]= 0.089320$	$P[4,5]= 0.067633$
$P[5,6]= 0.048673$	$P[5,5]= 0.058963$	$P[6,6]= 0.058342$	$P[6,5]= 0.129022$

- Representação Gráfica em GSPN

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 58.

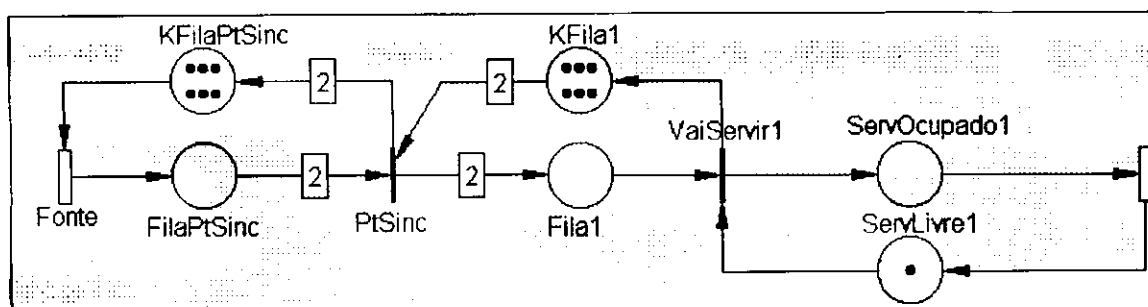


Figura 58 - Modelo de um protocolo de sessão com quarentena de dados e modo de diálogo duplex em GSPN.

### - Resultados Quantitativos em GSPN

As lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(FilaPtSinc, KfilaPtSinc, Fila1, Kfila1, ServOcupado1, ServLivre1)

Os estados tangíveis do modelo, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov são os seguintes:

060501	060510	061410	062310
063210	064110	065010	150501
150510	151410	152310	153210
154110	155010	244110	245010
334110	335010	424110	425010
514110	515010	604110	605010

### - Comparação das Cadeias de Markov

O número de estados tangíveis (24) do modelo é exatamente igual ao número de estados descritos no vetor de probabilidades utilizado por ALLOS. Além disso, os estados em si e as transições entre os estados são os mesmos, o que leva a duas cadeias de Markov equivalentes, e, portanto, a dois modelos equivalentes.

### - Resultados Qualitativos

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- a rede é limitada,
- a rede é viva,
- não há a possibilidade de bloqueios (deadlocks),

## 5.2.9. Modelo de uma Rede Local Anel com Política Randômica

### - Descrição e Representação Gráfica no SAVAD

A figura 59 apresenta o modelo de uma rede local anel com política randômica.

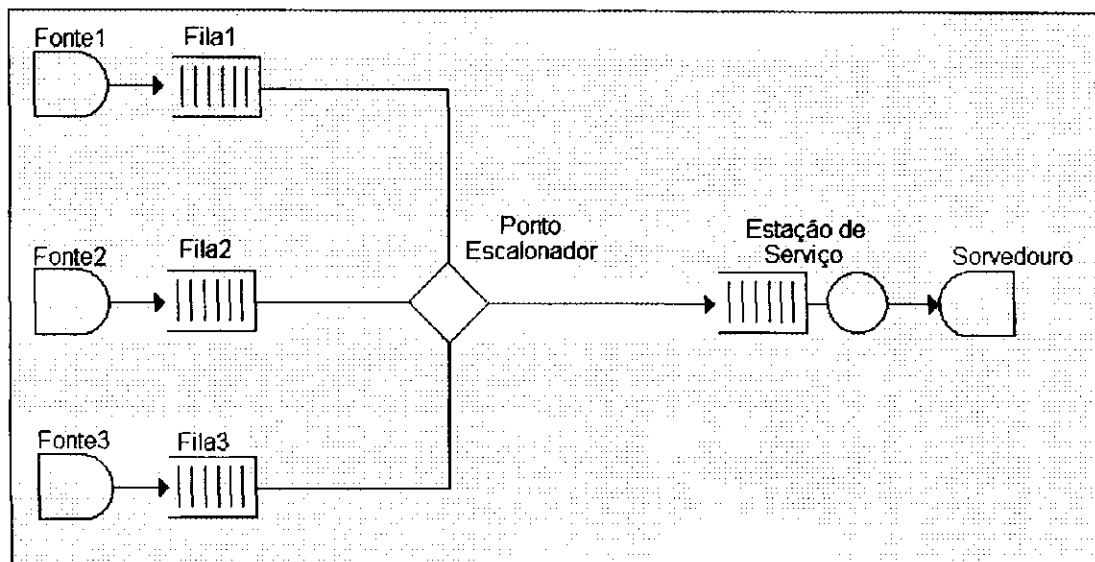


Figura 59 - Modelo de rede local anel com política randômica no SAVAD.

Nesse modelo, adotam-se os seguintes parâmetros:

Fonte

Nome	Distribuição de Serviço	Média
Fonte1	Exponencial	0,025
Fonte2	Exponencial	0,025
Fonte3	Exponencial	0,025

Estação de Serviço

Nome	Tipo	Quant.	Comp. de Fila (K)	Disciplina de Fila	Distribuição de Serviço	Média
Servidor	Simplex	1	1	FCFS	Exponencial	0,01

Sorvedouro

Nome
Sorvedouro

Ponto Escalonador

Nome	Nº de Filas	Disciplina de Escalonamento	Comprimento de Fila
PontoEscalonador	3	cíclica (1,2,3)	3

Classe

Nome	Prioridade
Classe	0 (sem prioridade)



Rota

Nome	Classe	Sequência de Nodos
Rota1	Classe	Fonte >> PontoEscalonador.Fila1 >> Servidor >> Sorvedouro
Rota2	Classe	Fonte >> PontoEscalonador.Fila2 >> Servidor >> Sorvedouro
Rota3	Classe	Fonte >> PontoEscalonador.Fila3 >> Servidor >> Sorvedouro

**- Resultados Quantitativos no SAVAD**

O vetor de probabilidades de estados para o modelo de rede local anel com política randômica, obtido utilizando o ALLOS, é o seguinte:

$P\{0,0,0,0\} = 0.059455$	$P\{0,1,0,0\} = 0.071118$	$P\{1,1,0,0\} = 0.028284$	$P\{0,1,1,0\} = 0.028284$
$P\{0,1,0,1\} = 0.028284$	$P\{1,1,0,1\} = 0.018671$	$P\{0,1,1,1\} = 0.018671$	$P\{0,1,0,2\} = 0.015036$
$P\{1,1,1,0\} = 0.018671$	$P\{0,1,2,0\} = 0.015036$	$P\{2,1,0,0\} = 0.015036$	$P\{1,1,0,2\} = 0.012947$
$P\{0,1,1,2\} = 0.012947$	$P\{0,1,0,3\} = 0.008794$	$P\{1,1,1,1\} = 0.016371$	$P\{0,1,2,1\} = 0.012947$
$P\{2,1,0,1\} = 0.012947$	$P\{1,1,2,0\} = 0.012947$	$P\{0,1,3,0\} = 0.008794$	$P\{2,1,1,0\} = 0.012947$
$P\{3,1,0,0\} = 0.008794$	$P\{1,1,0,3\} = 0.009813$	$P\{0,1,1,3\} = 0.009813$	$P\{1,1,1,2\} = 0.013592$
$P\{0,1,2,2\} = 0.011113$	$P\{2,1,0,2\} = 0.011113$	$P\{1,1,2,1\} = 0.013592$	$P\{0,1,3,1\} = 0.009813$
$P\{2,1,1,1\} = 0.013592$	$P\{3,1,0,1\} = 0.009813$	$P\{1,1,3,0\} = 0.009813$	$P\{2,1,2,0\} = 0.011113$
$P\{3,1,1,0\} = 0.009813$	$P\{1,1,1,3\} = 0.012405$	$P\{0,1,2,3\} = 0.009666$	$P\{2,1,0,3\} = 0.009666$
$P\{1,1,2,2\} = 0.013284$	$P\{0,1,3,2\} = 0.009666$	$P\{2,1,1,2\} = 0.013284$	$P\{3,1,0,2\} = 0.009666$
$P\{1,1,3,1\} = 0.012405$	$P\{2,1,2,1\} = 0.013284$	$P\{3,1,1,1\} = 0.012405$	$P\{2,1,3,0\} = 0.009666$
$P\{3,1,2,0\} = 0.009666$	$P\{1,1,2,3\} = 0.013582$	$P\{0,1,3,3\} = 0.009030$	$P\{2,1,1,3\} = 0.013582$
$P\{3,1,0,3\} = 0.009030$	$P\{1,1,3,2\} = 0.013582$	$P\{2,1,2,2\} = 0.014601$	$P\{3,1,1,2\} = 0.013582$
$P\{2,1,3,1\} = 0.013582$	$P\{3,1,2,1\} = 0.013582$	$P\{3,1,3,0\} = 0.009030$	$P\{1,1,3,3\} = 0.014784$
$P\{2,1,2,3\} = 0.016211$	$P\{3,1,1,3\} = 0.014784$	$P\{2,1,3,2\} = 0.016211$	$P\{3,1,2,2\} = 0.016211$
$P\{3,1,3,1\} = 0.014784$	$P\{2,1,3,3\} = 0.018783$	$P\{3,1,2,3\} = 0.018783$	$P\{3,1,3,2\} = 0.018783$
$P\{3,1,3,3\} = 0.022445$			

**- Representação Gráfica em GSPN**

O modelo equivalente em GSPN é exibido na figura 60.

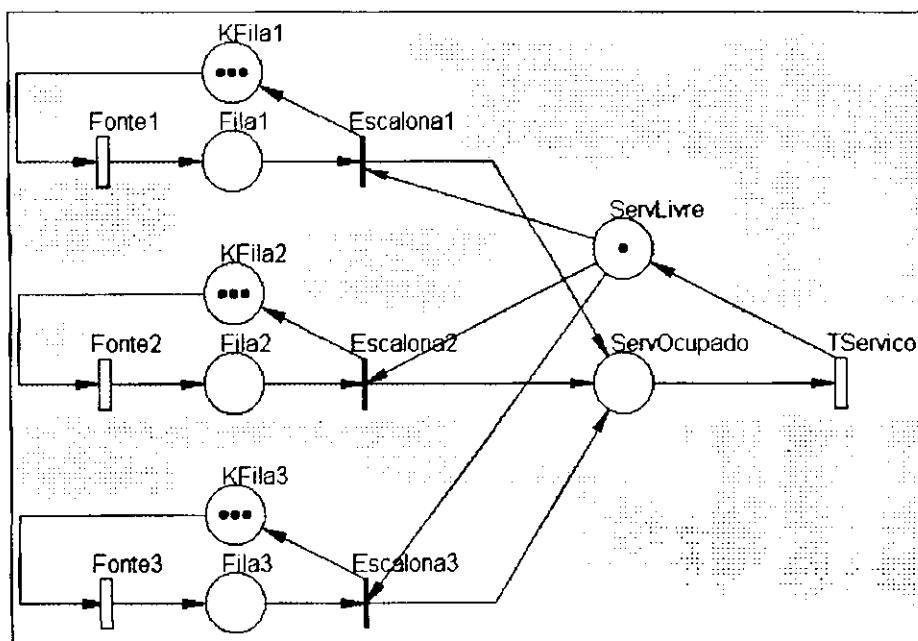


Figura 60 - Modelo de rede local anel com política de escalonamento randômica em GSPN.

### - Resultados Quantitativos em GSPN

Os lugares da GSPN estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(Kfila1, Fila1, Kfila2, Fila2, Kfila3, Fila3, ServLivre, ServOcupado)

Os estados tangíveis do modelo, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov são os seguintes:

```
03030301 03031201 03032101 03033001 03120301
03121201 03122101 03123001 03210301 03211201
03212101 03213001 03300301 03301201 03302101
03303001 12030301 12031201 12032101 12033001
12120301 12121201 12122101 12123001 12210301
12211201 12212101 12213001 12300301 12301201
12302101 12303001 21030301 21031201 21032101
21033001 21120301 21121201 21122101 21123001
21210301 21211201 21212101 21213001 21300301
21301201 21302101 21303001 30030301 30031201
30032101 30033001 30120301 30121201 30122101
30123001 30210301 30211201 30212101 30213001
30300301 30301201 30302101 30303001 30303010
```

### - Comparação das Cadeias de Markov

O número de estados tangíveis (65) do modelo é exatamente igual ao número de estados descritos no vetor de probabilidades utilizado por ALLOS. Além disso, os estados em si e as transições entre os estados são os mesmos, o que leva a duas cadeias de Markov isomórficas, e, portanto, a modelos equivalentes.

### - Resultados Qualitativos

O resultado da análise qualitativa para este modelo é:

- a rede é limitada,
- a rede é viva,
- não há a possibilidade de bloqueios (deadlocks).

### - Comentários Adicionais

Com referência ao elemento de modelagem ponto escalonador, somente foi possível validar integralmente um modelo com escalonamento randômico, conforme mostrado nesta subseção através de um modelo de uma rede local com política de escalonamento randômica.

As demais políticas de escalonamento, isto é, a cíclica e a livre, não foram implementadas em ALLOS. Mesmo assim, apresentamos a seguir um exemplo de modelo em GSPN que engloba o elemento de modelagem ponto escalonador com a política cíclica. Esse modelo representa uma rede local com passagem de ficha.

Na validação do modelo desta subseção, foi descoberto um equívoco na implementação do modelo de uma rede local com passagem de ficha apresentado em [OLIV 1995]. Nesse modelo não foi implementado a política de escalonamento cíclica, e sim, a política de escalonamento randômico. Nesta subseção foi apresentado o modelo correto, isto é, o modelo de uma rede local com escalonamento randômico.

### **- Modelo de uma Rede Local com Passagem de Ficha**

Em GSPN, para que a política de escalonamento cíclica seja implementada, há a necessidade de adicionar lugares e transições ao modelo, indicando qual a fila do ponto escalonador que está com a ficha, e portanto com a vez, e quando ocorre uma passagem de ficha.

Portanto, o modelo correto de uma rede local anel com passagem de ficha está exibido na figura 61.

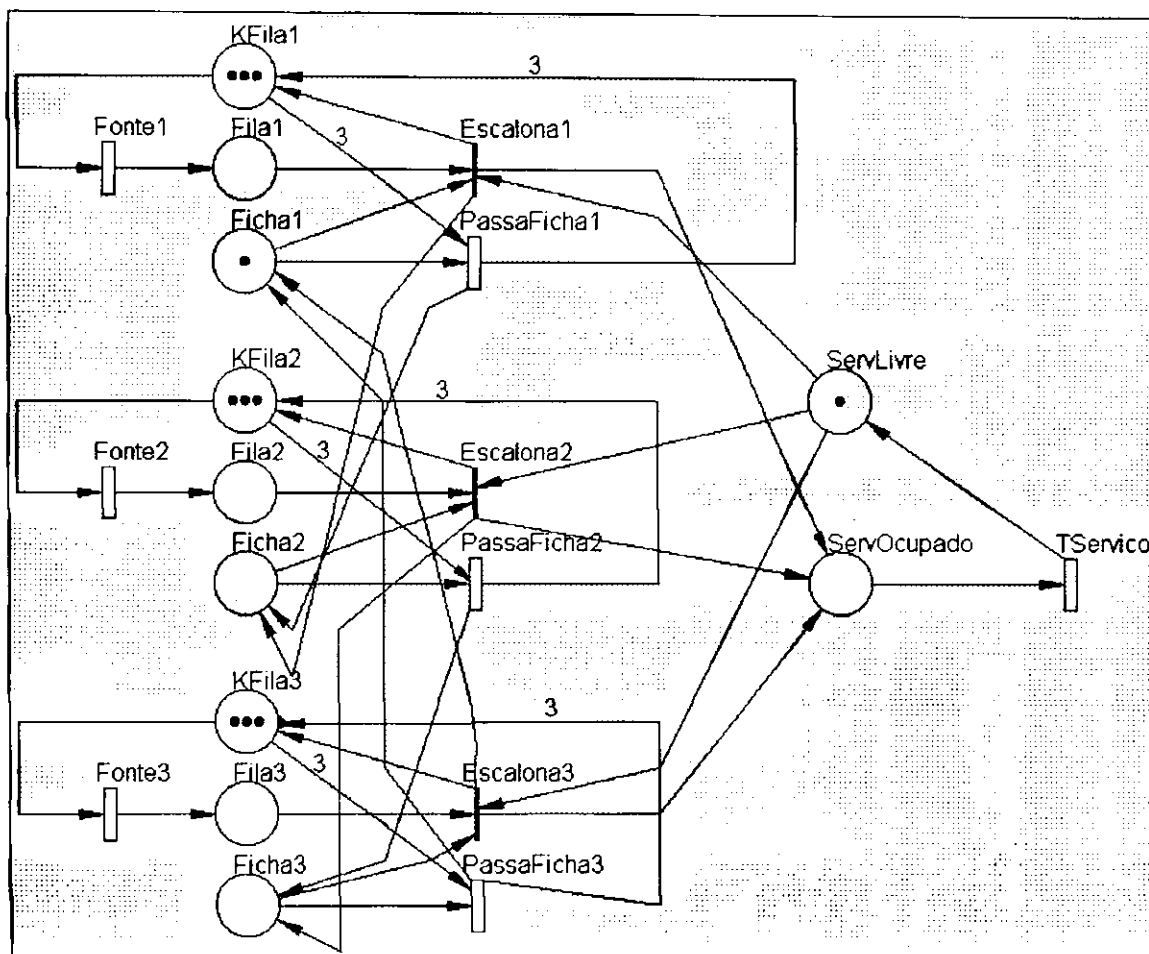


Figura 61 - Modelo de uma rede local anel com passagem de ficha em GSPN.

Os lugares da figura 61 estão na seguinte ordem no vetor de marcação:

(KFila1, Fila1, Ficha1, KFila2, Fila2, Ficha2, KFila3, Fila3, Ficha3, ServOcupado, ServLivre)

Os estados que formam a cadeia de Markov associada a esse modelo (240) englobam aqueles que formam a cadeia de Markov associada ao modelo de uma rede local com escalonamento randômico (65). Os estados adicionais estão relacionados com o mecanismo de controle de passagem de ficha adicionado nesse modelo.

Os estados tangíveis do modelo da figura 61, contração do grafo de alcançabilidade obtido com a ferramenta DNANet, que formam a cadeia de Markov, são os seguintes:

03003003110	03003012110	03003021110
03003030101	03003030110	03003103010
03003112010	03003121010	03003130010
03012003110	03012012110	03012021110
03012030101	03012030110	03012103010
03012112010	03012121010	03012130010

03021003110	03021012110	03021021110
03021030101	03021030110	03021103010
03021112010	03021121010	03021130010
03030003110	03030012110	03030021110
03030030101	03030030110	03030103001
03030103010	03030112001	03030112010
03030121001	03030121010	03030130001
03030130010	03103003010	03103012010
03103021010	03103030010	03112003010
03112012010	03112021010	03112030010
03121003010	03121012010	03121021010
03121030010	03130003010	03130012010
03130021010	03130030010	12003003110
12003012110	12003021110	12003030101
12003030110	12003103010	12003112010
12003121010	12003130010	12012003110
12012012110	12012021110	12012030101
12012030110	12012103010	12012112010
12012121010	12012130010	12021003110
12021012110	12021021110	12021030101
12021030110	12021103010	12021112010
12021121010	12021130010	12030003110
12030012110	12030021110	12030030101
12030030110	12030103001	12030103010
12030112001	12030112010	12030121001
12030121010	12030130001	12030130010
12103003010	12103012010	12103021010
12103030010	12112003010	12112012010
12112021010	12112030010	12121003010
12121012010	12121021010	12121030010
12130003010	12130012010	12130021010
12130030010	21003003110	21003012110
21003021110	21003030101	21003030110
21003103010	21003112010	21003121010
21003130010	21012003110	21012012110
21012021110	21012030101	21012030110
21012103010	21012112010	21012121010
21012130010	21021003110	21021012110
21021021110	21021030101	21021030110
21021103010	21021112010	21021121010
21021130010	21030003110	21030012110
21030021110	21030030101	21030030110
21030103001	21030103010	21030112001
21030112010	21030121001	21030121010
21030130001	21030130010	21103003010
21103012010	21103021010	21103030010
21112003010	21112012010	21112021010
21112030010	21121003010	21121012010
21121021010	21121030010	21130003010

21130012010	21130021010	21130030010
30003003110	30003012110	30003021110
30003030101	30003030110	30003103010
30003112010	30003121010	30003130010
30012003110	30012012110	30012021110
30012030101	30012030110	30012103010
30012112010	30012121010	30012130010
30021003110	30021012110	30021021110
30021030101	30021030110	30021103010
300221112010	30022121010	30022130010
30030003110	30030012110	30030021110
30030030101	30030030110	30030103001
30030103010	30030112001	30030112010
30030121001	30030121010	30030130001
30030130010	30103003001	30103003010
301030122001	30103012010	30103021001
30103021010	30103030001	30103030010
30112003001	30112003010	301120122001
30112012010	30112021001	30112021010
30112030001	30112030010	30121003001
30121003010	301210122001	30121012010
30121021001	30121021010	30121030001
30121030010	30130003001	30130003010
30130012001	30130012010	30130021001
30130021010	30130030001	30130030010

## Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões

### 6.1. Considerações Gerais

Nesta dissertação de mestrado foram apresentados estudos de equivalência entre modelos que representam sistemas markovianos construídos como sistemas de redes de filas, através do SAVAD, e como GSPN. Esses estudos possibilitam a integração de GSPN ao SAVAD, permitindo, a adição da análise qualitativa na solução desses modelos. A análise qualitativa realizada nesta dissertação volta-se à observação de duas propriedades importantes em modelos representados em GSPN: vivacidade e limitação. Os estudos de equivalência se baseiam no isomorfismo existente entre as cadeias de Markov obtidas por modelos representados com sistemas de redes de filas, solucionados através da ferramenta ALLOS do SAVAD e por modelos representados em GSPN.

Inicialmente, os estudos realizados consistiram em representar, um a um, os elementos do SAVAD como modelos em GSPN. Em seguida, esses modelos em GSPN puderam então ser conectados, seguindo a mesma ordem do modelo equivalente do SAVAD, o que viabilizou a criação de modelos mais complexos em GSPN. Tais modelos, quando solucionados, apresentaram cadeias de Markov equivalentes, isto é, apresentaram os mesmos resultados quantitativos que aqueles obtidos com o SAVAD (através do módulo ALLOS).

Foi evidenciado, no decorrer dos estudos, a necessidade de um software que permitisse modelar, analisar e encontrar o grafo de alcançabilidade de modelos em GSPN. Isso porque os modelos utilizados para a validação da equivalência de modelos construídos com os elementos do SAVAD e em GSPN, apresentavam espaços de estados grandes para a análise e obtenção do grafo de alcançabilidade, o que inviabilizava a realização manual dessas tarefas. Vários softwares de modelagem e análise de GSPN foram selecionados e testados (QPN-Tool, GreatSPN, SIMNet, DNANet). Porém, apenas DNANet apresentou todas as funcionalidades requeridas, além do que, podia ser disponibilizado gratuitamente. Com o DNANet foi possível analisar qualitativamente os modelos construídos com os elementos do SAVAD observando-se

duas propriedades importantes em modelos representados em GSPN: vivacidade e limitação.

Os elementos de modelagem do SAVAD, quando construídos em GSPN, também serviram para serem certificados sobre a efetividade da implementação do que estava descrito nas especificações funcionais do programa. Conforme abordado no capítulo 5, através da análise do modelo em GSPN foi possível descobrir um equívoco de denominação do modelo que englobava o elemento ponto escalonador com disciplina randômica.

Os estudos realizados encontraram um problema adicional no SAVAD: a solução de modelos inconsistentes. Isso ocorre porque o SAVAD não submete os modelos a uma análise qualitativa antes de realizar a análise quantitativa. Com isso, modelos que possuem bloqueios, ou até mesmo modelos completamente mortos, podem passar despercebidos e serem analisados quantitativamente.

Exemplos desse fato são os modelos exibidos nas figuras 55 e 57, respectivamente. Ambos são passíveis de bloqueios (deadlocks) quando sofrem uma pequena modificação. Por exemplo, se na figura 55, na marcação inicial, não houver freguês na segunda fila do ponto de sincronização, a rede fica morta (figura 62). Um caso similar ocorre na figura 57: quando o número de fregueses que deve passar pelo ponto de sincronização é maior que a capacidade da fila de entrada do mesmo elemento, a rede também fica morta (figura 63).

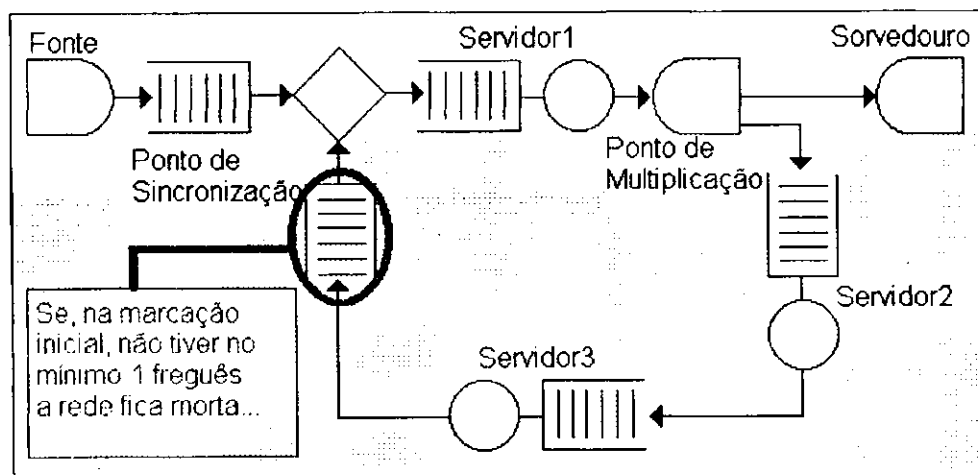


Figura 62 - Possível deadlock no modelo da figura 55.



- Fonte, Fonte, Fonte, Fonte, Fonte, Fonte
- A rede não é viva (há um bloqueio)

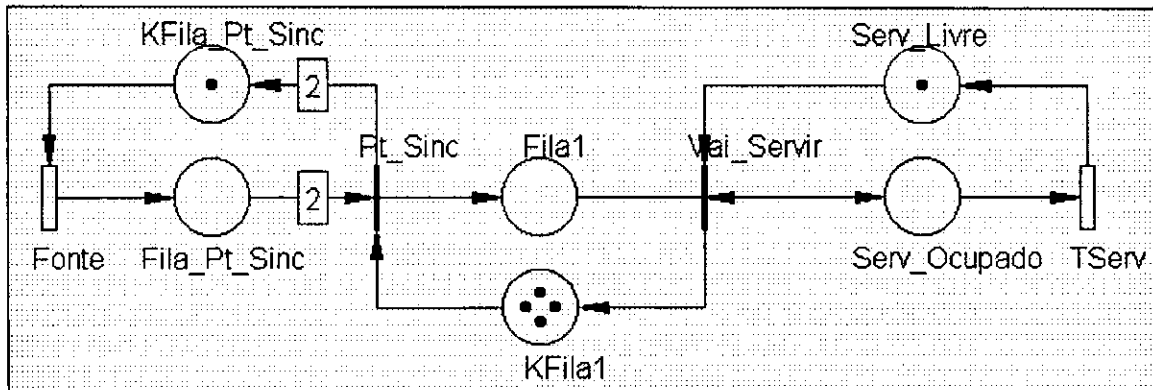


Figura 65 - Modelo da figura 63 em GSPN.

Os resultados da ferramenta DNANet para o modelo da figura 65 são os seguintes:

- A rede é limitada
- Um bloqueio é possível através da seguinte sequência de transição:
  - Fonte
- A rede não é viva (há um bloqueio)

### 6.2. Trabalhos Futuros

Seguem algumas sugestões visando a continuação dos estudos iniciados na presente dissertação:

- Inclusão de um módulo no SAVAD que disponibilize ferramentas que realizem análise qualitativa dos modelos de redes de filas em GSPN. Para que isso seja possível, torna-se necessário incluir no SAVAD outro módulo que gere automaticamente modelos em GSPN equivalentes aos modelos do SAVAD.
- Construção e análise de modelos em GSPN equivalentes a novos elementos do SAVAD antes que estes venham a ser implementados no SAVAD. Isso, com certeza, diminuirá a probabilidade de ocorrência de equívocos, como o que aconteceu com o elemento ponto escalonador do SAVAD, já que é simples observar e validar o comportamento dos modelos em GSPN.

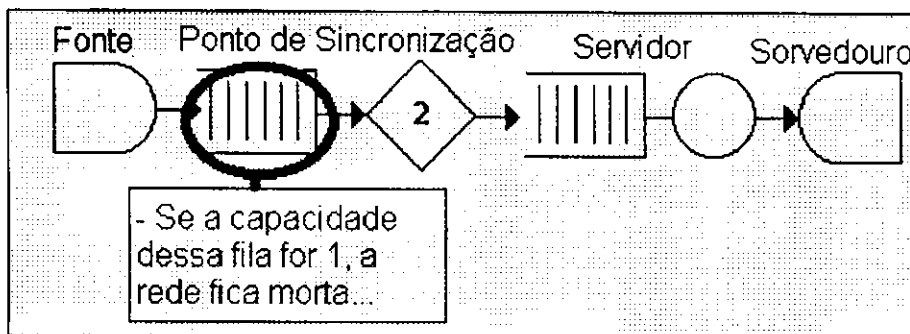


Figura 63 - Possível deadlock no modelo da figura 57.

Esses dois casos só podem ser verificados quando os modelos equivalentes em GSPN são analisados qualitativamente, o que é exibido nas figuras 64 e 65, respectivamente, pois o SAVAD considera os modelos ausentes de erros e os passa para serem solucionados por ALLOS, que, possivelmente, fornece resultados incoerentes com a realidade do sistema modelado.

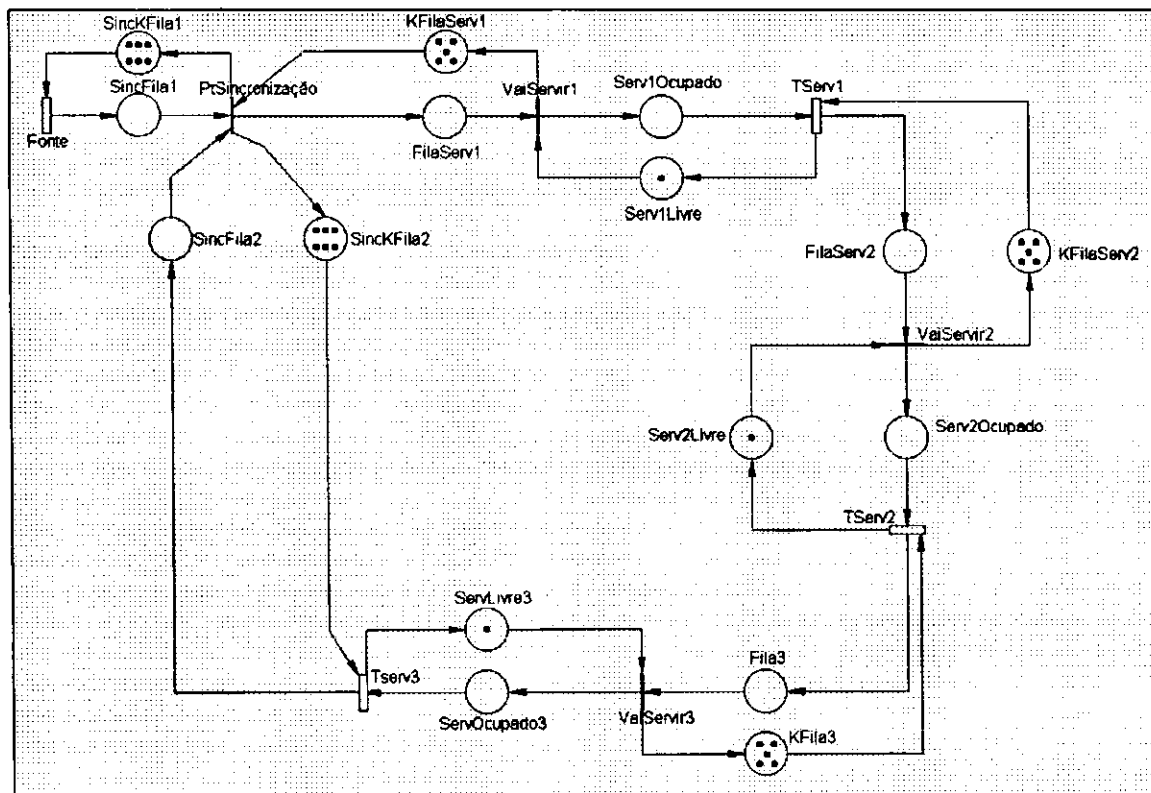


Figura 64 - Modelo da figura 62 em GSPN.

Os resultados da ferramenta DNANet para o modelo da figura 64 são os seguintes:

- A rede é limitada
- Um bloqueio é possível através da seguinte sequência de transição:

- Estudos, em redes de Petri, referentes à adição de fichas que possam carregar atributos para caracterizar classes distintas de fregueses e modelar as políticas de escalonamento.
- Estudo de equivalência entre modelos em redes de filas e redes de Petri que utilizem distribuições de probabilidades diferentes da exponencial. As redes de fila com distribuição de tempo do tipo exponencial são apenas um dos tipos de redes de filas solucionadas pelo SAVAD. O SAVAD soluciona os modelos de redes de filas com outras distribuições de tempo.
- Utilização dos estudos de equivalência desta dissertação aplicados ao elemento ponto escalonador para implementação completa deste elemento no SAVAD.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [BAUS, 1995] Bause, F. et alli; **Queueing Petri Nets (QPN)**; <http://ls4-www.informatik.uni-dortmund.de/QPN>; 1995.
- [BONE, 1996] **BONES Designer User's Guide**; Alta Group of Cadence Design Systems Inc.; 1996.
- [CABR, 1989] Cabral, M. I. C. et alli; **SAVAD – Uma Ferramenta Para Avaliar o Desempenho de Sistemas Distribuídos**; Seminaire Franco-Brésilien Sur Les Systems Informatiques Repartis; Florianópolis, SC; Setembro, 1989.
- [CAMP, 1992] Campos, J. e Silva, M.; **Structural Techniques and Performance Bounds of Stochastic Petri Nets Models**; Advances in Petri Nets; 1992.
- [JEAN, 1993] Jean-Marie, A.; **Stochastic Petri Nets**; Summer Schools on Discrete Events Systems; Junho 1993.
- [KELT, 1998] Kelton, W. D; **Simulation with Arena**; McGraw Hill; USA; 1998.
- [KLEI, 1975] Kleinrock, L.; **Queueing Systems**; Vol. 1; John Wiley and Sons; USA; 1975.
- [KNOT, 1995] Knottenbelt, W.; **DNAnet – A Petri Net Concurrent Systems Modelling Tool**; <http://www.cs.uct.ac.za/~william/DNAnet.html>; Cape Town, South Africa, 1995.
- [MARS, 1989] Marsan, M. A.; **Stochastic Petri Nets: An Elementary Introduction**; Advances in Petri Nets; 1989.
- [MARS, 1995] Marsan, M. A. et alli; **Modelling With Generalized Stochastic Petri Nets**; John Wiley and Sons; Italy; 1995.
- [MEYE, 1985] Meyer, J. F. et alli; **Stochastic Activity Network: Structure, Behavior and Application**; Proceedings of the International Conference on Timed Petri Nets; Torino, Italy; July 1985.
- [MOLL, 1982] Molloy, M. K.; **Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets**; IEEE Transactions on Computers; No 9; September, 1982.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- [MURA, 1989] Murata, T.; **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**; Proceedings of the IEEE; Vol. 7; N° 4; April, 1989.
- [OLIV, 1995] Oliveira, S. R. M.; **ALLOS – Uma Ferramenta Para Solucionar Modelos de Redes de Filas Usando Cadeias de Markov**; Dissertação de Mestrado; UFPb / CCT / DSC / COPIN; Campina Grande, PB; Brasil; 1995.
- [PETE, 1981] Peterson, J. L.; **Petri Nets Theory and The Modeling of Systems**; Prentice-Hall; Englewood Cliffs, NJ; 1981.
- [REIS, 1985] Reisig, W.; **Petri Nets – An Introduction**; Springer-Verlag; Berlin; Germany; 1985.
- [SOU1, 1993] Souto, F. A. C.; **SAVAD - Sistema de Avaliação de Desempenho de Modelos de Redes de Filas**; Dissertação de Mestrado; UFPb / CCT / DSC / COPIN; Campina Grande, PB; Brasil; 1993.
- [SOU2, 1993] Souto, F. A. C.; **Projeto Orientado a Objetos do SAVAD - Sistema de Avaliação de Desempenho de Modelos de Redes de Filas**; Relatório Técnico; UFPb / CCT / DSC / COPIN; Campina Grande, PB; Brasil; 1993.
- [STRA, 1984] Strack, J.; **GPSS – Modelagem e Simulação de Sistemas**; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; Rio de Janeiro, RJ; Brasil; 1984.