STOCHASTIC FEATURE CHARTS
- Uma Extensão Estocástica para os Statecharts*

Carlos Renato Lisboa Francês *1
Marcos José Santana *2
Regiane Yumiko da Silva Kawasaki *3

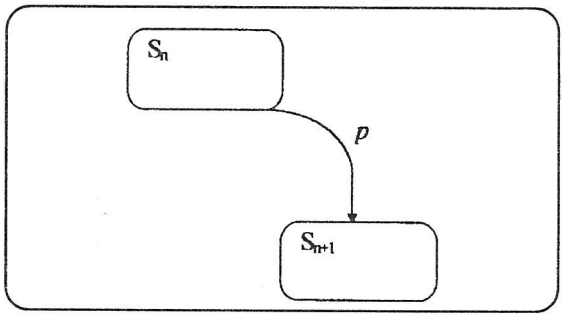
RESUMO Este artigo apresenta uma extensão estocástica original para os statecharts (*Stochastic Feature Charts - SFC*), cujo objetivo é prover uma avaliação probabilística associando cadeias de Markov aos *statecharts*. Assim, um sistema pode ser visualizado através de seus estados e transições entre esses estados. O objetivo principal é estender os *statecharts* e criar uma ferramenta com características similares às encontradas em redes de fila e de Petri. A extensão proposta, SFC, é usada para avaliar o desempenho de um servidor de arquivos baseado em rede local, considerando três modelos distintos, com níveis de complexidade diferentes. O comportamento das probabilidades é observado e os resultados obtidos são discutidos para validar a extensão para *statecharts* proposta.

1. Introdução

A necessidade de se representar mais que apenas o comportamento do sistema, fez com que fossem criadas extensões a algumas técnicas formais, com a finalidade precípua de representar os sistemas de maneira mais real, incluindo um comportamento probabilísticos, como é o caso de algumas extensões das redes de Petri, por exemplo, Stochastic Petri Nets [9] e Generalized Stochastic Petri Nets [1]. Os Statecharts, porém, ainda não possuem uma extensão com esse propósito, apesar de já sugerido por David Harel [4]. Este artigo propõe uma extensão aos Statecharts, denominada de Stochastic Feature Charts (SFC) [3], que objetiva associar os Statecharts às cadeias de Markov, podendo-se assim determinar de maneira probabilística as mudanças de estados ocorridas em um sistema com o decorrer do tempo. As seções seguintes apresentam a especificação SFC, realizando a associação statecharts/cadeias de Markov, para, posteriormente, ilustrar um estudo de caso de um servidor de arquivos, estabelecendo conclusões e observações sobre a análise e aplicabilidade dos SFC.

2. Stochastic Feature Charts (SFC)

Pode-se imaginar um Statechart como um conjunto de estados S, onde há uma probabilidade p de se transicionar de um estado-origem sn para um estado-destino sn+1 ((si (S), conforme Figura 1.



Formalmente, Stochastic Feature Chart é definido como uma tripla:

SFC = < oS, S o, P>, onde:

oS é a bag de estados de entrada; So é a bag de estados de saída;

P é bag das probabilidades de um estado de entrada si transicionar para um estado de saída sj.

*1 Mestre em Ciência da Computação, USP - São Carlos; Doutorando em Ciência da Computação, USP - São Carlos.
*2 Livre Docente da USP - São Carlos;
*3 Mestre em Ciência da Computação, USP - São Carlos;

2.1. Notação SFC

Algumas modificações na notação original dos statecharts são propostas com o intuito de cobrir certas especificações sugeridas aqui e que, logicamente, não poderiam ter sido abordadas no diagrama original.

O diagrama SFC possui basicamente três elementos, como segue (Figura 2):

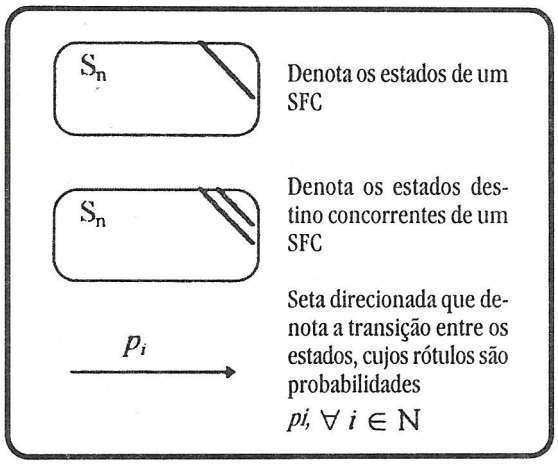


Figura 2. Notação SFC

2.2. Estados Absorventes

Formalmente, um estado ai de um SFC é dito absorvente se o sistema permanece no estado ai, uma vez que este tenha sido visitado. Assim, um estado ai é chamado absorvente se somente se a i-ésima linha da matriz de transição P tem 1 (um) na diagonal principal e 0 (zeros) nas outras posições. A matriz da Figura 3 ilustra essa possibilidade.

	A	B	C
A	0	p_1	p_2
B	0	1	0
C	0	0	1

Com $p1 + p2 = 1$, B e C são estados absorventes

Figura 3. Matriz de Transição com Estados Absorventes.

Pode-se supor que, por exemplo, um processo ao abandonar o processador deve seguir ou para uma impressora ou para um monitor de vídeo. O estado A representa o processador de um computador, e B e C representam os dispositivos de entrada/saída monitor de vídeo e impressora, respectivamente. Assim, para a situação do SFC abaixo, a matriz de transição da Figura 3 seria adequada, pois B e C são estados absorventes, ou seja, ao serem visitados, o sistema permanece neles.

A Figura 4 ilustra a mesma situação num gráfico SFC

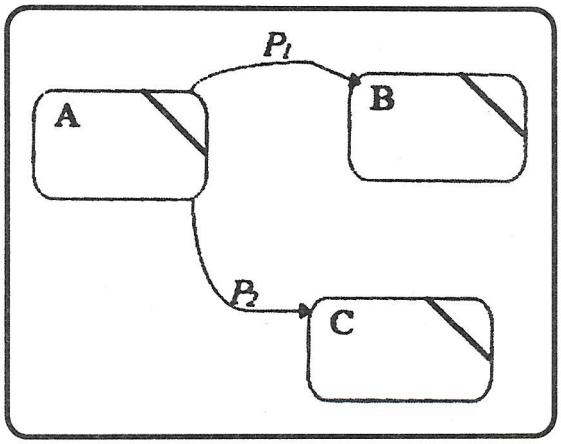


Figura 4. SFC com estados B e C absorventes

.2.3. Matrizes Regulares, Vetores Fixos e SFC Regulares

Uma matriz estocástica P é considerada regular se somente se todas as entradas de alguma de suas potências P2, P3,...Pn têm seus valores positivos [6][8]. As matrizes estocásticas regulares possuem a propriedade importante de haver um único vetor fixo t de probabilidade, cujas componentes de t são todas positivas. Supondo-se que, por exemplo, t = (x, 1-x) seja o vetor fixo da matriz regular P, então o produto de t e P resultará nos valores dos componentes do vetor fixo. A Figura 5 ilustra essa afirmativa. Analogamente para qualquer matriz regular, podem-se obter os valores das componentes do vetor através da resolução do sistema gerado pela multiplicação do vetor t pela matriz P, e através da igualdade, encontrar valores para

$$(x,\ 1\text{-}x)\begin{bmatrix} p & 1\text{-}p \\ q & 1\text{-}q \end{bmatrix} = (x,\ 1\text{-}x) \therefore \quad (px+q(1\text{-}x),\ (1\text{-}p)x+(1\text{-}q)(1\text{-}x)) = (x,\ 1\text{-}x)$$

$$\text{logo, o vetor } t = (q/(1\text{-}p+q),\ 1-(q/(1\text{-}p+q)))$$

Figura 5. Vetor fixo de uma matriz estocástica regular

componentes de t (x e 1-x, no exemplo da Figura 5). À medida que se realiza a seqüência de suas n potências (etapas), e observado que a matriz de transição P obtida é uma matriz regular, então P converge a uma matriz T, cujas linhas tendem ao único vetor fixo t, isto é, com o aumento do valor de n (potências de P), P converge para T.

Baseando-se na teoria de Markov, pode-se estender o conceito de matriz estocástica regular aos SFC. Assim, um SFC é considerado regular se há uma potência de sua matriz de transição P que tem todas as suas entradas positivas. Considere-se um exemplo de uma transmissão de pacotes em um meio de comunicação e suponha-se que o sistema possua os estados A (Fila de pacotes), estado B (canal livre) e estado C (canal ocupado), representados pelo SFC da Figura 6 e que se tenha a seguinte matriz de transição (Figura 7).

A semântica da matriz de transição (e do próprio SFC) é a seguinte: um pacote sai da fila de pacotes (estado A) ou para encontrar o canal livre (estado B, com probabilidade p1) ou ocupado (estado C, com probabilidade p2). Na primeira hipótese (transição para o estado B), haverá apenas uma probabilidade p3 de transicionar de B para C, significando que após a transmissão, o canal passa de livre para ocupado. Uma última situação a ser abordada é a tentativa de transmissão em um canal ocupado (estado C) e o retorno do pacote à fila (estado A, com probabilidade p4). Empiricamente, observa-se que a quinta potência de P (P5) é a primeira potência de P que possui todas entradas positivas (Figura 8), logo P é uma matriz regular. Entretanto, essa

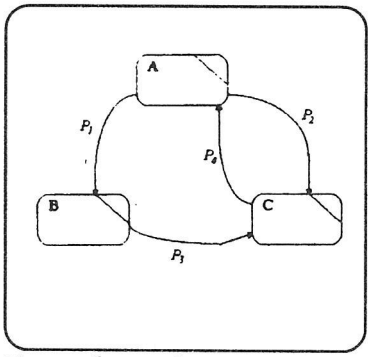


Figura 6. SFC de uma Linha de Comunicação.

	A	B	C
A	0	p_1	p_2
B	0	0	p_3
C	p_4	0	0

Figura 7. Matriz de Transição do SFC da Figura 6.

$$P5 = \begin{array}{c} \\ A \\ B \\ C \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} A & B & C \end{array} \\ \begin{bmatrix} 2p_1p_2p_3p_4^2 & p_1p_2^2p_4^2 & p_1^2p_3^2p_4+p_2^3p_4^2 \\ p_1p_3^2p_4^2 & p_1p_2p_3p_4^2 & p_2^2p_3p_4^2 \\ p_1^2p_4^3 & p_1^2p_3p_4^2 & 2p_1p_2p_3p_4^2 \end{bmatrix} \end{array} \quad \forall\ 0 < p_1, p_2, p_3, p_4 < 1$$

Figura 8. Quinta Potência da Matriz de Transição P.

conclusão não é intuitiva, pois deve-se observar o seguinte fator determinante: se há algum elemento pij =1 na diagonal principal, tanto na matriz P original, quanto em uma de suas potências Pm, então a matriz P não é regular, logo o SFC também não o é.

Modificando-se ligeiramente o exemplo apresentado para uma linha de comunicação, conforme ilustra o SFC da Figura 9, tem-se que a semântica do SFC é semelhante àquela da Figura 6, exceto pelo fato de que caso o canal esteja ocupado (estado C), o pacote retorna à fila. Aqui, o sistema permanece em C, o que provavelmente gere um comportamento de colisão (como acontece nos protocolos de acesso ao meio não-determinísticos, como o CSMA e CSMA/CD). O SFC da Figura 9 não é regular, pois o estado C é absorvente (só possui estados de entrada). As implicações dessa característica são apresentadas a seguir.

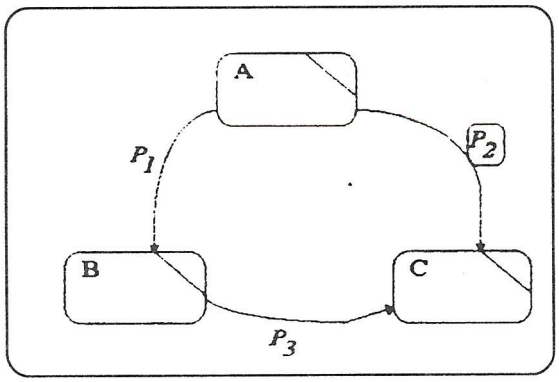


Figura 9. SFC de um Canal de Comunicação com Colisão.

2.4. Probabilidade de Transição em Várias Etapas

Pode-se supor que, em algum instante arbitrário, a probabilidade de que o sistema esteja no estado ai seja pi. Essa probabilidade é representada pelo vetor p = (p1, p2, ... , pm) que é chamado distribuição de probabilidade do sistema naquele instante. Em particular, as distribuições de probabilidades inicial e na n-ésima etapa, respectivamente, são: p(0) = (p1(0), p2(0), ... , pm(0)) e p(n) = (p1(n), p2(n), ... , pm(n)). O teorema da transição em várias etapas especifica que: seja P a matriz de transição de uma cadeia de Markov. Se p = (pi) é a distribuição de probabilidades do sistema em algum instante arbitrário, então pP é a distribuição de probabilidades do sistema na etapa seguinte e pPn é a distribuição de probabilidades do sistema após as n etapas seguintes [7]. Em particular: p(1) = p(0) P, ..., p(n) = p(0) Pn. Assim, pode-se imaginar um sistema qualquer, no qual possam ocorrer várias iterações, como aquele ilustrado no SFC da Figura 9. Supondo-se, ainda, que há mais de uma iteração, ou seja, há mais de uma transmissão de pacotes. A partir dessa situação, pode-se pretender determinar qual seria a probabilidade do sistema alcançar o estado A após, por exemplo, três iterações. Pode-se ainda supor que a distribuição de probabilidade inicial é p = (0, 1/2, 1/2), isto é, a probabilidade de A permanecer em A é nula, e que A pode transicionar para B ou C com a mesma probabilidade. Pelo teorema anterior, tem-se (Figura 10): p(3) = p(0) P3 , ou ainda

$$p^{(3)} = (0,\ 1/2,\ 1/2) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \therefore \quad p^{(3)} = (0,\ 0,\ 1)$$

Figura 10. Vetor Distribuição de Probabilidades após Três Etapas.

A conclusão é de certa forma óbvia: após exatamente três etapas, a probabilidade do sistema se encontrar no estado A ou B é nula, pois C é um estado absorvente e o sistema, após alcançar C pela primeira vez, permanecerá nele indefinidamente.

Agora, pode-se supor que um SFC seja regular, por exemplo, como aquele apresentado na Figura 6. Se o SFC é regular, então a sua matriz de transição P também o é. Para essa situação, o teorema da distribuição estacionária de uma cadeia de Markov regular pode ser estendido naturalmente aos SFC.

O teorema da distribuição estacionária de uma cadeia de Markov regular especifica que: supondo-se que uma matriz de transição P, de uma cadeia de Markov, seja regular. Então para n suficientemente grande, a probabilidade de que qualquer estado aj ocorra é aproximadamente igual à correspondente tj do único vetor fixo de probabilidade, t, de P, para todo j [7]. Assim, o que se observa em um SFC regular é que o efeito do estado inicial ou da distribuição inicial do sistema desaparece conforme o número de etapas aumenta. Além disso, toda seqüência de distribuição de probabilidade converge para o vetor fixo de probabilidade, t, de P, chamado distribuição estacionária de um SFC.

Retomando-se o exemplo da Figura 6, o SFC é regular, pois sua matriz de transição também o é. Então, após n etapas do SFC, a probabilidade de, por exemplo, o sistema se encontrar no estado B em um determinado instante tende à sua correspondente no vetor fixo t, de sua matriz de transição P. Assim, considerando que a distribuição de probabilidade inicial do SFC é p(0) = (0, 1/2 , 1/2), pode-se observar que, para um número n suficientemente grande de etapas, a influência da distribuição inicial desaparece (Figura 11). Deve-se entender por "desaparecimento da influência da distribuição inicial" o fato de que, apesar do vetor fixo t ter sido obtido a partir da distribuição de probabilidade inicial, t, muito provavelmente, apresentará valores distintos de p(0). Não se deve, contudo, interpretar que, para qualquer distribuição de probabilidade inicial, obter-se-á o mesmo vetor t. Assim, observa-se que a probabilidade do sistema se encontrar, por exemplo, no estado B, isto é, canal livre, após n etapas, é de 1/5, independentemente do valor 1/2 da distribuição de probabilidades inicial.

2.5. Estados AND em um SFC

Estados são considerados concorrentes (do tipo AND) se estando em um estado, o sistema deve estar em todos os seus componentes AND simultaneamente [4]. A Figura 12 apresenta um Statechart com estados AND. A semântica do Statechart acima especifica que os estados A e D são concorrentes, isto é, A e D ocorrem simultaneamente (chamado de produto ortogonal entre A e D). Os subestados de A e D obedecem às mesmas regras de transições dos estados OR, exceto pelo fato de que o mesmo evento pode ocorrer em ambos os estados. No exemplo da Figura 12, há uma ocorrência dessa situação: o evento e1 tanto transiciona o Statechart do estado B para o C (superestado A), quanto do estado F para G (superestado D).

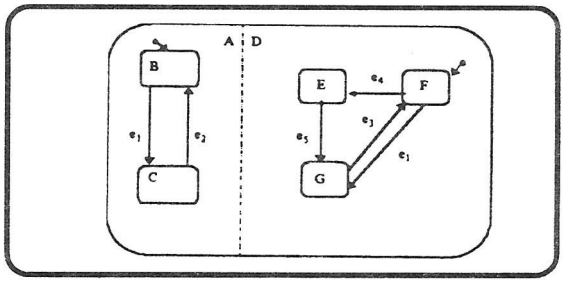


Figura 12. Statechart com Estados Concorrentes.

$$(x, y, 1\text{-}x\text{-}y) \begin{bmatrix} 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (x, y, 1\text{-}x\text{-}y)$$

$$= (1\text{-}x\text{-}y,\ x/2,\ x/2 + y) = (x, y, 1\text{-}x\text{-}y)$$

$$y = 1/5 \quad e \quad x = 2/5$$

$$\begin{matrix} & A & B & C \end{matrix}$$

$$(x, y, 1\text{-}x\text{-}y) = (2/5,\ 1/5,\ 2/5)$$

Figura 11. Distribuição Estacionária de um SFC.

A Figura 13 apresenta o Statechart anterior em notação SFC. Da mesma forma, os estados A e D são concorrentes (estados AND). Entretanto, em SFC há duas adequações a serem feitas: os estados destino que são transicionados pela ocorrência de um mesmo evento recebem duas linhas diagonais no canto superior direito (estados C e G, acima); e na seta que conduz a esse estado deve constar a probabilidade comum ao evento (probabilidade p1, entre B e C, e F e G).

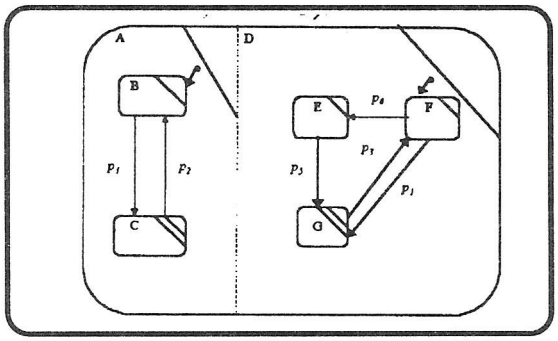


Figura 13. SFC com Estados Concorrentes.

Portanto, pretende-se, dessa forma, dividir estados AND em seus estados OR correspondentes, podendo-se elaborar uma matriz de transição para cada estado OR, simplificando, assim, a análise. Porém, deve-se sempre atentar para o fato de que estados que são transicionados pelo mesmo evento, devem possuir a mesma probabilidade de transição. Para o Statechart da Figura 13, podem-se criar uma matriz de transição para o estado A e uma para o estado D, e interpretá-las separadamente, como dois estados OR independentes, mantendo apenas a propriedade de conservar a mesma probabilidade para estados que transicionam graças à ocorrência do mesmo evento. A Figura 14 apresenta as matrizes dos dois estados (do tipo OR) A e D do SFC anterior.

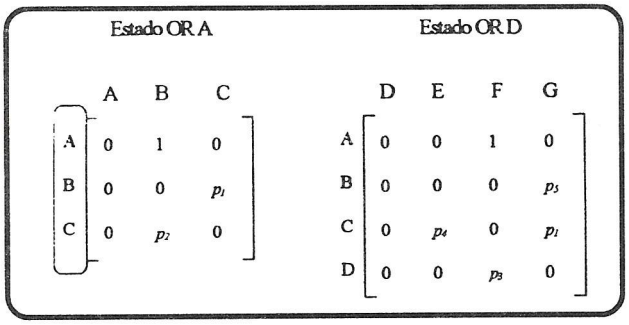


Figura 14. Estado AND Visto através de seus Estados OR.

Uma observação simples das duas matrizes de transição já possibilita a dedução de uma característica importante do SFC da Figura 13: se p1 deve possuir o mesmo valor em ambas as matrizes, então p1 = 1 (pois cada linha da matriz do estado OR A deve possuir soma de seus pij = 1), o que implica em p4 = 0 (na matriz do estado OR D), ou seja, na distribuição de probabilidades inicial, o sistema não tem possibilidade de transicionar de F para E.

2.6. Estudo de Caso

Esta seção apresenta uma aplicação para a extensão proposta, considerando três modelos com níveis de complexidade diferentes. O problema é abordado em [2] e implica em investigar o comportamento de um servidor de arquivos, sendo que o servidor pode assumir três formas apresentadas a seguir nos modelos de redes de filas e redes de Petri. Aqui, a abordagem se atém à análise probabilística do desempenho. O primeiro modelo (figura 15) representa um servidor em sua forma mais simples, isto é, uma requisição vinda da rede entra em uma fila de um processador até ser atendida pelo mesmo quando ele estiver livre, e, a partir daí, a requisição ocupa o processador e, após o atendimento, retorna à rede.

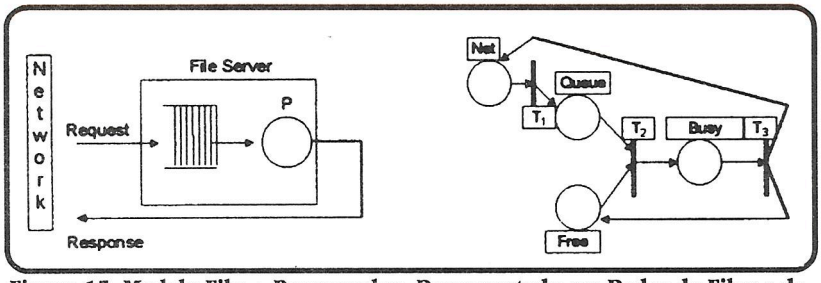


Figura 15. Modelo Fila + Processador Representado em Redes de Filas e de Petri.

Mais dois modelos em [2] ainda são estudados. Um modelo, de complexidade intermediária, apresenta uma variação do primeiro, incluindo-se, após o servidor, um disco e sua fila. Esse modelo intermediário é mostrado na figura 16.

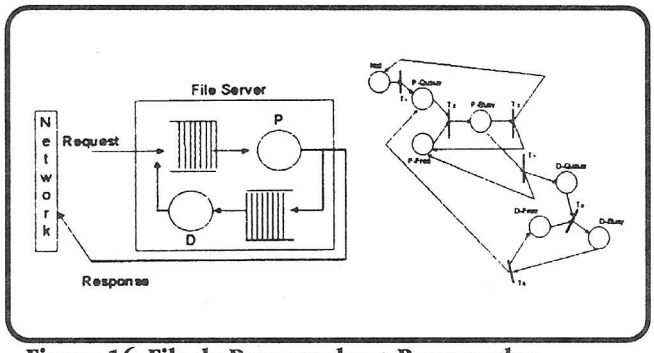


Figura 16. Fila do Processador + Processador + Fila do Disco + Disco

Um último modelo ainda é discutido, sendo o de maior complexidade. Nesse caso, além dos elementos contidos no modelo anterior, são acrescidos mais dois processadores front-end de entrada e de saída (PFE-I e PFE-O, respectivamente). A figura 17 apresenta essa última variação do modelo Servidor de Arquivos.

3.1. Modelo Fila e Processador

Para a situação mais simples, o gráfico SFC é mostrado a seguir (figura 18), ilustrando os passos da execução do modelo. A tonalidade gris no diagrama representa o estado atual do SFC na execução, e a numeração sob cada passo indica a seqüência obedecida pela execução. A semântica do SFC segue a idéia dos modelos em redes de Petri e redes de filas, ou seja, ao ocorrer uma requisição, o sistema passa de um estado Net (indicando que a requisição foi efetuada via rede) para um estado denominado File Server.

Esse estado é um superestado, possuindo os subestados Queue (fila do processador), Free Proc (processador disponível) e Busy Proc (processador ocupado). O estado default de File Server é a fila (Queue), pois uma requisição vinda da rede, obrigatoriamente, deve entrar na fila do processa-dor, mesmo que essa fila esteja vazia. Uma vez na fila, a requisição só muda de estado se o processador estiver disponível (estado Free Proc). Se a requisição ocupa o processador, ela leva o mesmo a um estado de ocupado (Busy Proc). Assim, tem-se a seguinte matriz de transição P para

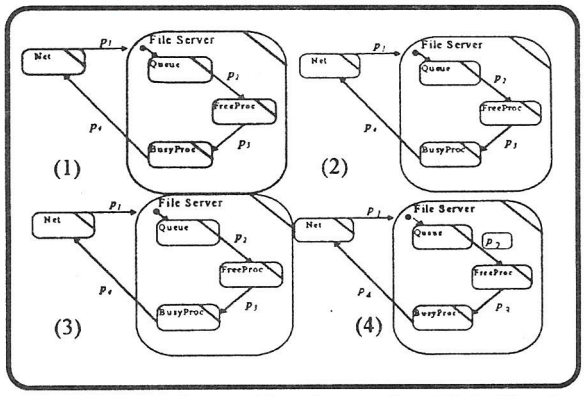


Figura 18. SFC do Servidor de Arquivos Mais Simples.

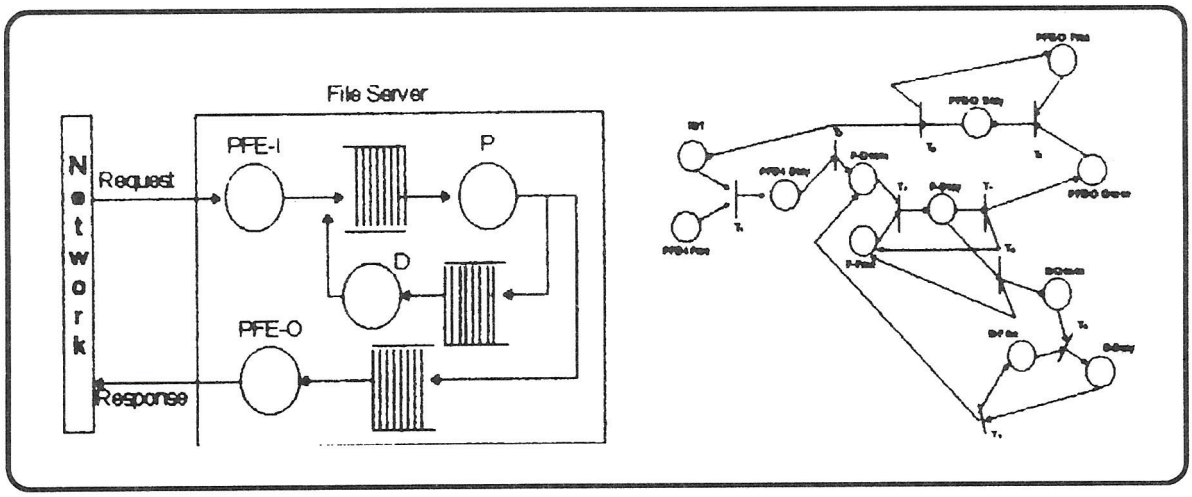


Figura 17. Fila + Processador + Fila +Disco + PFE-I + Fila do PFE-O + PFE-O .

o SFC em questão (figura 19). Como forma de facilitar a representação, os estados estão representados pelas letras iniciais dos seus nomes (como, N para o estado Net).

$$P = \begin{array}{c} \\ N \\ FS \\ Q \\ FP \\ BP \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} N & FS & Q & FP & BP \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Figura 19. Matriz de Transição do SFC Fila + Processador.

Uma matriz estocástica como a anterior, apenas composta por zeros e uns não terá uma potência cujas entradas sejam todas positivas. Esse fato fica ainda mais claro quando se verifica que na quinta potência de P, há a ocorrência da matriz identidade, cuja diagonal principal é toda composta por 1s. Portanto, se não há uma potência cujas entradas sejam todas positivas, então P não é regular, logo não haverá uma etapa onde todos os estados tenham probabilidades de alcançar a todos os demais. Também não haverá um vetor único, cujas linhas da matriz de transição (para n suficientemente grande) tenderão aos valores das componentes do vetor.

$$P^5 = \begin{array}{c} \\ N \\ FS \\ Q \\ FP \\ BP \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} N & FS & Q & FP & BP \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Figura 20. Potências da Matriz Não Regular P.

A seguir (figura 20), é apresentada a quinta potência da matriz P. A quinta potência de P é a matriz identidade e, a partir dela, não se pode obter uma matriz cujas componentes sejam todas positivas. A interpretação desse fato implica em não ser possível para uma requisição poder alcançar (ou seja, ter probabilidade) mais de um estado na mesma etapa. Por exemplo, uma requisição que não completou o seu serviço (como nos casos dos sistemas operacionais de tempo compartilhado), volte à fila do processador (Queue), antes de retornar à rede.

3.2. Modelo Fila do Processador + Processador + Fila do Disco + Disco

Para a situação intermediária, tem-se o SFC da figura 21 e sua respectiva matriz de transição P (figura 22). O SFC apresenta um estado cuja transição pode enveredar para mais de um estado destino (no exemplo em questão, o estado Busy Proc transicionar ou para Queue-D ou para Net).

A partir da matriz de transição inicial (P0), obtêm-se algumas características do sistema representado pelo SFC. Essas conclusões são apresentadas a seguir:

1. O SFC é regular, pois sua matriz de transição também o é. Essa propriedade pode ser verificada de duas maneiras:

* O SFC não possui estados absorventes, o que significa que o sistema nunca ficará retido em um determinado estado indefinidamente. Esse fato pode ser verificado pela ausência de 1s na diagonal principal da matriz de transição inicial.

* A regularidade da matriz e do SFC pode ser verificada através de suas

potências (Pn), caso seja verificado que há uma potência que possua todas as entradas pij positivas. A potência P33 da matriz de transição original (figura 23) possui essa característica.

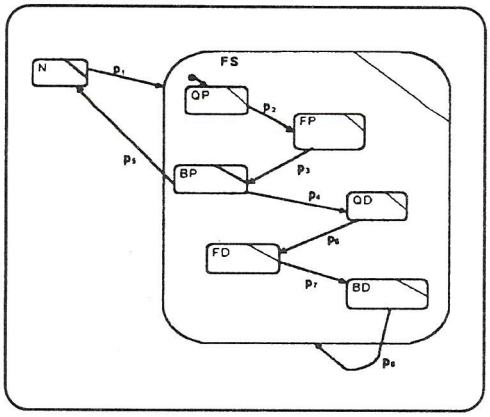


Figura 21. SFC de Fila do Processador + Processador + Fila do Disco + Disco.

2. A partir da primeira potência toda positiva (P33), observa-se que todos os estados são alcançáveis, isto é, partindo-se de um estado qualquer e, logicamente, passando pelos estados intermediários, a partir de 33 etapas, todos os estados têm probabilidades de serem alcançados. Por exemplo, na primeira etapa, o estado N (rede) não tem probabilidade de alcançar o estado FP (processador livre), pois N só pode transicionar para FS. Entretanto, em mais de uma etapa (nesse caso, exatamente em P8), N pode alcançar FP, através de outros estados, ou seja, a entrada da matriz que representa a interseção da linha N (rede) com a coluna FP (processador livre) possui valor positivo.

3. No caso estudado, o SFC é regular, logo pode-se encontrar um único vetor fixo de probabilidades, cujas componentes eqüivalem à tendência dos valores das potências Pn (para n suficientemente grande). Isso significa que com o aumento do número de etapas a influência da distribuição de probabilidade inicial p(0) ((0,1,0,0,0,0,0,0), nesse exemplo) desaparece. A figura 24 apresenta o cálculo do vetor fixo de probabilidade para a matriz de transição de 22.

A observação do vetor fixo especifica que, para um número n suficientemente grande de etapas, a probabilidade de se alcançar um determinado estado tende à sua correspondente nesse vetor fixo. Assim, para o caso em estudo, a probabilidade do sistema se encontrar nos estados N, QD, FD e BD é de 1/12 (cerca de 8%), e em FS, QP, FP e BP é de 1/6 (aproximadamente 16%). Esses valores são totalmente diferentes daqueles contidos na distribuição de probabilidades inicial p(0) = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0), o que atesta a veracidade do teorema da distribuição estacionária.

4. Ainda se pode verificar um outro aspecto probabilístico, que está relacionado ao fato de que, em um sistema qualquer, um estado pode retornar a si mesmo, após a ocorrência de m passos (intervalos de tempos). Portanto, para o caso em estudo, pode-se, por exemplo, afirmar, qual seria a probabilidade de uma requisição partir da rede e retornar a ela, em exatamente 3 passos, a partir etapa 33 conforme ilustrado a seguir.

Ou seja, na etapa 33, a probabilidade de N permanecer em N é de 0,15 (conforme figura 23). Entretanto, a probabilidade de N retornar a N em 3 passos tende a zero.

p [tempo de permanência no estado N seja 3 passos o SFC acaba de assumir o estado N] = $(0,15)^3$ (1-0,15) $\cong$ 0,002

	N	FS	QP	FP	BP	QD	FD	BD
N	0	1	0	0	0	0	0	0
FS	0	0	1	0	0	0	0	0
QP	0	0	0	1	0	0	0	0
FP	0	0	0	0	1	0	0	0
BP	1/2	0	0	0	0	1/2	0	0
QD	0	0	0	0	0	0	1	0
FD	0	0	0	0	0	0	0	1
BD	0	1	0	0	0	0	0	0

Figura 22. Matriz de Transição Inicial do SFC de Complexidade Intermediária.

O último modelo apresenta uma variação do segundo caso. Porém, aqui são incluídos dois processadores front-end (um de entrada: PFE-I, e um de saída: PFE-O). O PFE de entrada não possui fila, isso significa que uma requisição é sempre atendida de forma imediata por ele, sem ter que entrar em uma

fila de espera. Já o PFE de saída possui uma fila, ou seja, para retornar à rede, a requisição deve passar pela fila do PFE-O, para depois ser atendida por ele, e só aí poder regressar à rede. O SFC e sua matriz de transição para esse último modelo está na figura 25.

O SFC da figura 25 é regular, pois a potência P60 da matriz de transição só possui entradas positivas, conforme figura 26. A partir dessa constatação, serão apresentadas algumas considerações a respeito do comportamento probabilístico do último modelo, que, às vezes, são extensíveis aos outros modelos, em etapas específicas.

* Nas etapas próximas da matriz estocástica com todas as entradas positivas (P60 nesse caso, e P33 no exemplo anterior), há uma probabilidade considerável do estado permanecer nele mesmo (em algumas linhas da matriz, é a entrada de valor mais alto). Esse fato pode ser verificado observando-se os valores da diagonal principal das potências elevadas, o que não ocorre nas etapas iniciais. Se tomar-se, particularmente, os estados Net e File Server, esse aspecto probabilístico pode indicar uma situação de sobrecarga no servidor, havendo, assim, uma tendência maior de uma requisição obter o servidor com maior dificuldade, após um certo número de iterações.

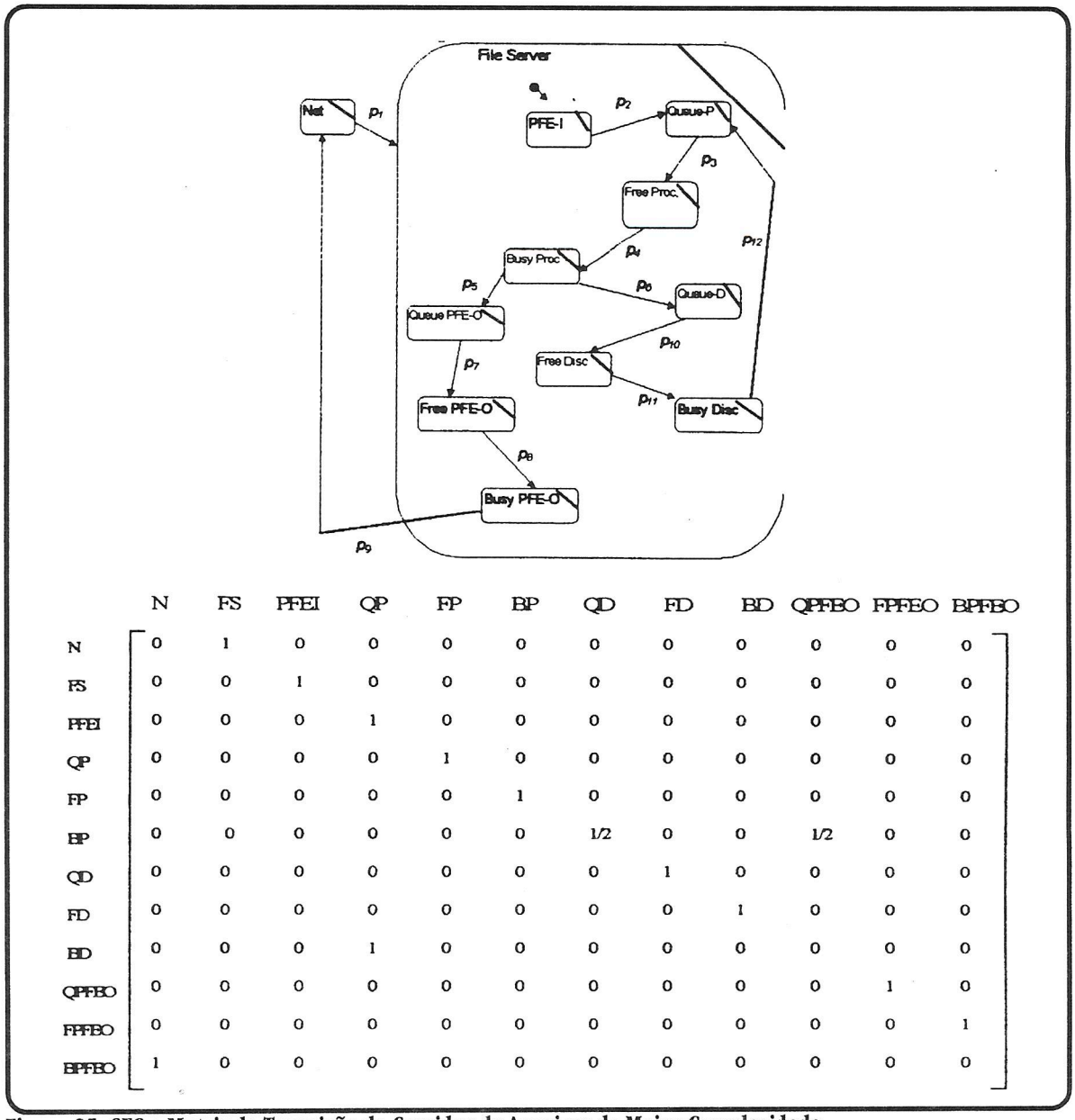
$$P33 = \begin{array}{c} \\ N \\ FS \\ QP \\ FP \\ BP \\ QD \\ FD \\ BD \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} N & FS & QP & FP & BP & QD & FD & BD \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0.15 & 0.16 & 0.1 & 0.31 & 0.02 & 0.15 & 0.03 & 0.08 \\ 0.01 & 0.23 & 0.16 & 0.1 & 0.31 & 0.01 & 0.15 & 0.03 \\ 0.15 & 0.05 & 0.23 & 0.16 & 0.1 & 0.15 & 0.01 & 0.15 \\ 0.06 & 0.28 & 0.07 & 0.24 & 0.14 & 0.06 & 0.12 & 0.03 \\ 0.08 & 0.06 & 0.3 & 0.04 & 0.24 & 0.08 & 0.05 & 0.15 \\ 0.11 & 0.25 & 0.08 & 0.32 & 0.03 & 0.11 & 0.06 & 0.04 \\ 0.03 & 0.1 & 0.3 & 0.02 & 0.3 & 0.04 & 0.09 & 0.12 \\ 0.15 & 0.16 & 0.1 & 0.31 & 0.02 & 0.15 & 0.03 & 0.08 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$(A, B, C, D, E, F, G, H) \begin{array}{c} \\ N \\ FS \\ QP \\ FP \\ BP \\ QD \\ FD \\ BD \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} N & FS & QP & FP & BP & QD & FD & BD \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} = (1/12, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/12, 1/12, 1/12)$$

Figura 23. P33 com Todas as Entradas Positivas. Figura 24. Vetor Fixo de Fila Processador + Processador + Fila Disco + Disco.

3.3. Modelo Fila do Processador + Processador + Fila do Disco +Disco + PFE-I + Fila do PFE-O + PFE-O

* Na etapa da matriz estocástica toda positiva, há uma tendência de probabilidade relativamente baixa de um estado transicionar para o seu consecutivo. Tomando-se como exemplo a matriz P60 do último modelo abordado e, particularmente, dois de seus estados (Servidor de Arquivos (FS) e Processador front-end de



	N	FS	PFEI	QP	FP	BP	QD	FD	BD	QPFBO	FPFEO	BPFBO
N	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FS	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFEI	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
QP	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
FP	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
BP	0	0	0	0	0	0	1/2	0	0	1/2	0	0
QD	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
FD	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
BD	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
QPFBO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
FPFBO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BPFBO	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 25. SFC e Matriz de Transição do Servidor de Arquivos de Maior Complexidade.

entrada (PFEI)), há uma probabilidade de 0,01 (quase nula) para que FS transicione para PFEI. Em contrapartida, na distribuição de probabilidade inicial havia uma probabilidade igual a 1 (evento totalmente provável) dessa transição ocorrer.

* Um fato a ser observado também é o impacto que a realização do número de etapas acarreta no comportamento probabilístico do modelo. Tomando-se novamente o último modelo como base, e, em particular, o seu estado Net, pode-se observar empiricamente que a probabilidade de Net permanecer em Net é 0 (zero) até a nona etapa (P9), onde essa probabilidade passa de 0 para 0.50 (50%), ou seja, de uma probabilidade nula para 1/2 de probabilidade, o que é um aumento súbito. Especificamente, para esse caso, essa mudança abrupta pode indicar o início da saturação do servidor de arquivos.

* Esse comportamento anômalo se ratifica ain-

	N	FS	PFEI	QP	FP	BP	QD	FD	BD	QPFEO	FPFEO	BPFEO
N	0.10	0.07	0.05	0.13	0.12	0.11	0.09	0.06	0.06	0.09	0.10	0.02
FS	0.06	0.14	0.01	0.06	0.32	0.01	0.04	0.15	0.11	0.04	0.06	0.04
PFEI	0.04	0.01	0.14	0.22	0.01	0.28	0.07	0.01	0.01	0.07	0.04	0.10
QP	0.09	0.05	0.07	0.14	0.07	0.16	0.09	0.05	0.05	0.09	0.07	0.07
FP	0.07	0.13	0.01	0.07	0.28	0.02	0.05	0.13	0.11	0.05	0.07	0.01
BP	0.05	0.01	0.13	0.20	0.01	0.25	0.08	0.01	0.01	0.08	0.05	0.12
QD	0.06	0.05	0.09	0.17	0.10	0.17	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08
FD	0.10	0.07	0.05	0.13	0.12	0.11	0.09	0.06	0.06	0.08	0.09	0.04
BD	0.06	0.14	0.01	0.06	0.28	0.01	0.04	0.15	0.14	0.04	0.06	0.01
QPFEO	0.04	0.01	0.14	0.22	0.01	0.22	0.07	0.01	0.01	0.07	0.04	0.16
FPFEO	0.06	0.13	0.02	0.07	0.29	0.02	0.05	0.13	0.13	0.05	0.06	0.02
BPFEO	0.05	0.01	0.13	0.20	0.01	0.26	0.07	0.01	0.01	0.07	0.05	0.13

Figura 26. Potência P60 da Matriz de Transição do SFC de Maior Complexidade.

da mais quando, observada a faixa das potências que vai de P10 a P14, a probabilidade de Net permanecer em Net volta a ser zero. Portanto, P9 mostra indícios de sobrecarga do servidor gerada nas etapas anteriores (Figura 27).

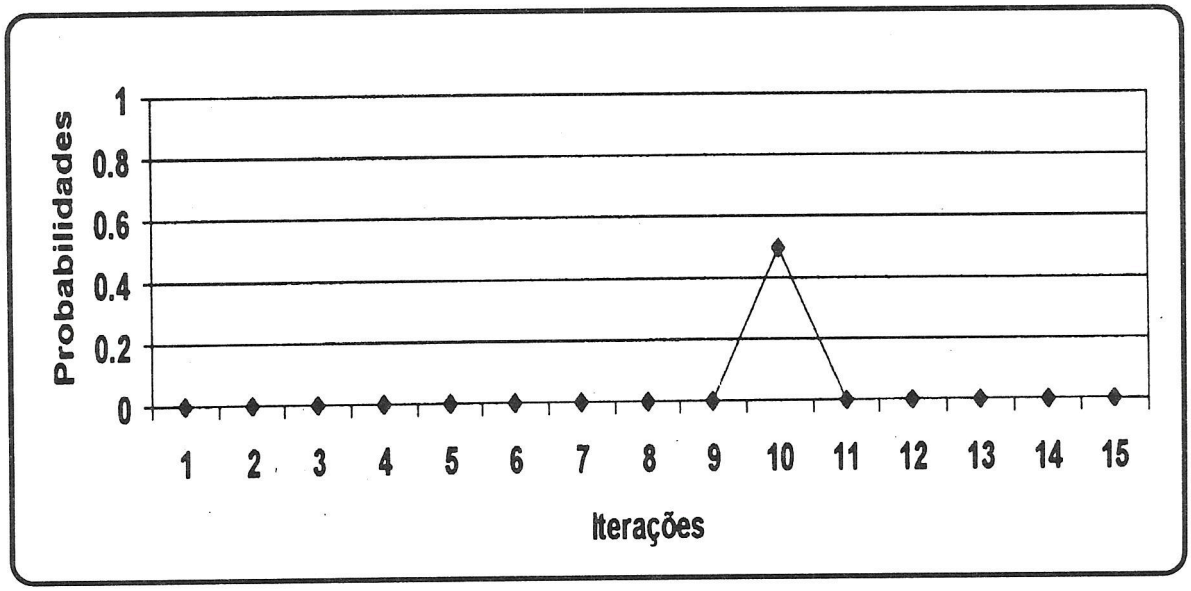


Figura 27. Comportamento Anômalo de Valores Probabilísticos de NET.

4. Considerações Finais

SFC visa associar duas características importantes: a clareza do diagrama Statechart e o poder de análise das cadeias de Markov. Statecharts possuem capacidades que não estão presentes (explicitamente) em outras técnicas de representação, como por exemplo hierarquia e concorrência entre estados. Cadeias de Markov possuem uma análise estocástica precisa para sistemas em que a ocorrência de um determinado estado só depende, no máximo, do estado antecessor, o que é uma característica presente, por exemplo, nas distribuições exponenciais, que são bastante representativas dos fenômenos computacionais.

A análise SFC não engloba as cadeias de Markov que tratam o tempo como um fenômeno contínuo, e sim discreto. Essa restrição pretende ser eliminada em estudos futuros, quando será acrescido à análise o cálculo diferencial e integral. A atual análise se atém em valores probabilísticos das cadeias de Markov discretas. Além disso, muitos sistemas complexos (NET, no estudo de caso) são tratados como estados simples, para se evitar conjuntos de distribuições de probabilidades diferentes no mesmo estudo. Fatos como esse deverão ser resolvidos por aplicações de redes bayesianas [5], que admitem interação de diferentes distribuições de probabilidades.

A interpretação SFC utiliza mecanismos simples de manipulação (basicamente, a matriz de transição), o que proporciona uma alta aplicabilidade à técnica, tanto no que se refere a uma análise manual, quanto a uma análise computacional. SFC ainda está servindo de base para o Ambiente Provedor de Avaliação Estocástica - APAE, que é um ambiente que está sendo desenvolvido tanto para plataforma Windows quanto para Linux e, através do qual, a partir de um modelo criado pelo usuário final, utilizando-se SFC, o ambiente fornecerá (de uma maneira transparente) uma avaliação de desempenho semelhante àquela provida pelas redes de fila [10].

4. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

CHIOLA, G., MARSAN, M. A. , CONTE, G. Generalized stochastic Petri Nets: a definition at the Net Level and its implications. *IEEE Transactions on software Engineering*. [S.L.], v.19, nº2, 1993.

FRANCÊS, C. R. L. , SANTANA, R. H. C. , ORLANDI, R. C. *Tools and methodologies for Performance Evaluation of Distributed Systems* : a Comparison Study , in the Proceedings of the 1997 Summer Computer Simulation Conference. Arlington, Virginia, p. 124-128, jul. 1997.

FRANCÊS, C. R. L. *Stochastic Feature Charts*: uma extensão estocástica para os statecharts . São Paulo: USP, 1998. (Dissertação de Mestrado).

HAREL, D. *Statecharts*: a visual formalism for complex systems, science of computer programming. North-Holland, nº 8, p. 231-274, 1987.

HECKERMAN, D. Bayesian Networks for Data Mining. *Data Mining and Knowledge Discovery, Kluwer Academic Publishers*. [S.L], v.1, p. 79-119, 1997.

KOVACS, Zsolt, L. *Teoria da Probabilidade e Processos stocásticos*. [S.L.]: Acadêmica, 1996.

LIPSCHULTZ, Seymour. *Probability*. São Paulo: Makron Books, 1994.

MEYER, Paul L. *Probabilidade*: Aplicações à Estatística. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MOLLOY, M. K. Performance Evaluation Using Stochastic Petri Nets. *IEEE Transactions Computer*. [S.L.], v.31, nº 9, p. 913-917, set. 1982.

SANTANA, M. J. , SANTANA, R. H. C. , SPOLON, R. A *Graphical User-Interface for and Automatic Simulation System in The Proceedings of the 1997 Summer Computer Simulation Conference*. Portland, Oregon, p. 139-143, jul. 1996.