

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO
DESCRITOS ATRAVÉS DE REDES DE PETRI
TEMPORIZADAS ESTENDIDAS

Hamilton Fernandes de Mattias

Wilson Vicente Ruggiero

Departamento de Engenharia Elétrica
da Escola Politécnica da USP

RESUMO

A metodologia para análise de desempenho de sistemas de computação consiste basicamente de um modelo adequado para a descrição do sistema e de sua análise para obtenção de estimativas de desempenho do sistema.

Um novo modelo, denominado Rede de Petri Temporizada Estendida (RPTE), é proposto para a representação de sistemas. O modelo é baseado em redes de Petri com extensões de forma a conseguir descrever o comportamento dinâmico de um sistema.

A etapa de análise torna-se difícil conforme aumenta a complexidade do modelo. Nestes casos, sentiu-se necessidade de uma ferramenta de auxílio, que foi desenvolvida para simulação e obtenção de estimativas de desempenho do modelo.

A metodologia provou ser prática e eficiente para a obtenção de estimativas de desempenho de várias classes de sistemas, tais como sistemas distribuídos, protocolos de comunicação, sistemas de tempo real ou sistemas em geral com dependência no tempo.

O modelo e a ferramenta são demonstrados pela aplicação à análise de desempenho do sistema "Agência Locadora de Automóveis".

Palavras Chaves: Análise de desempenho, redes de Petri, redes de Petri temporizadas, sistemas distribuídos, protocolos de comunicação.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe uma metodologia completa para a análise de desempenho de sistemas de computação em geral. Tal metodologia está baseada numa forma de modelamento do sistema de interesse e na análise do mesmo para obtenção de estimativas de desempenho. O modelamento é feito por uma nova versão de rede de Petri temporizada desenvolvida a partir de outros trabalhos ([ZUBE80], [RAZO85], [HOLL87]). A escolha da forma de modelamento recaiu desde o início em rede de Petri por ser uma ferramenta simples e poderosa de descrever a estrutura lógica de um sistema e por já existirem regras de conversão de sistemas distribuídos desenvolvidos em MCD (Modelo de Computação Distribuída) para redes de Petri ([BRES85]).

A metodologia é apresentada na seção 2 deste artigo. A seção 3 demonstra a sua aplicação na obtenção de estimativas de desempenho do sistema "Agência Locadora de Automóveis".

2. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

A metodologia para análise de desempenho de sistemas consiste de:

- a. Um modelo adequado para representação do sistema.
- b. Identificação de grandezas no modelo que retratem informações de desempenho do sistema por ele representado.
- c. Análise do modelo para observação das grandezas identificadas.

O modelo tem a finalidade de descrever o sistema a ser analisado. Da mesma forma que em muitas ciências, toma-se o modelo do sistema a ser estudado ao invés de observar o sistema real. Por análise de sua representação, espera-se obter informações sobre o sistema modelado e sobre o próprio modelo sem o custo ou inconveniência de se estudar o sistema real, ou mesmo pela sua não disponibilidade.

O modelamento de sistemas, na metodologia de análise de desempenho proposta por este trabalho, será feito através de Redes de Petri Temporizadas Estendidas (RPTEs), conforme apresentado abaixo. Através da representação da estrutura lógica do sistema por Redes de Petri e da associação de parâmetros que dizem respeito à dependência que o sistema possui em relação ao tempo, é possível descrever completamente o comportamento dinâmico do sistema.

Uma vez obtido o modelo do sistema, passa-se para a segunda etapa que consiste na identificação de grandezas no mesmo que informem sobre o desempenho do sistema modelado. Várias são as grandezas observáveis no modelo e sua interpretação em termos do que representam no sistema, ou seja, a tradução da grandeza observada no modelo em informação de desempenho do sistema, sempre vai depender do contexto: da grandeza, do elemento do modelo ao qual ela está associada, do modelo e do sistema modelado. Alguns exemplos de interpretações serão dados quando da apresentação das grandezas no item 2.2 e da aplicação da metodologia ao sistema "Agência Locadora de Automóveis" no item 3.

A obtenção dessas grandezas é feita por análise do modelo. Para modelos simples, tais resultados podem ser obtidos por pura observação, associada a alguns poucos cálculos. No entanto,

para modelos complexos a análise torna-se mais difícil e uma ferramenta de análise se faz necessária. Esta ferramenta para análise do modelo foi desenvolvida e será aplicada na análise de desempenho do sistema tomado como exemplo no item 3.

A análise baseia-se na simulação do sistema através da execução do modelo, durante a qual são colecionadas informações sobre as grandezas observáveis. A execução é feita respeitando estritamente as regras do modelo, de forma a retratar a execução do sistema que o mesmo representa.

2.1. Recursos para modelamento do sistema

Os recursos de modelamento adotados permitem descrever o comportamento dinâmico do sistema, tanto através de sua evolução de estados como também considerando a duração de cada evento que ocorre dentro dele. Isto é conseguido através da adoção de determinadas extensões propostas por alguns autores às redes de Petri, constituindo-se numa entre as várias classes de redes de Petri temporizadas existentes na literatura. A estrutura da rede de Petri descreve o fluxo de controle do sistema, enquanto parâmetros a ela associados informam a dependência no tempo. A descrição do modelo, bem como de novas extensões a ele adicionadas no intuito de fortalecer seu poder de modelamento, consiste na definição completa de uma forma de modelamento de sistemas. Esta definição é a base da metodologia de análise e foi denominada de Rede de Petri Temporizada Estendida (RPTE).

Uma rede de Petri corresponde a um grafo dirigido bipartido com dois tipos de vértices que se denominam **lugares** (círculos) e **transições** (barras), sendo os símbolos entre parênteses utilizados na representação gráfica. A figura 1 mostra um exemplo desse tipo de representação. Observar que os **arcos** são orientados e saem de um lugar para uma transição, ou de uma transição para um lugar.

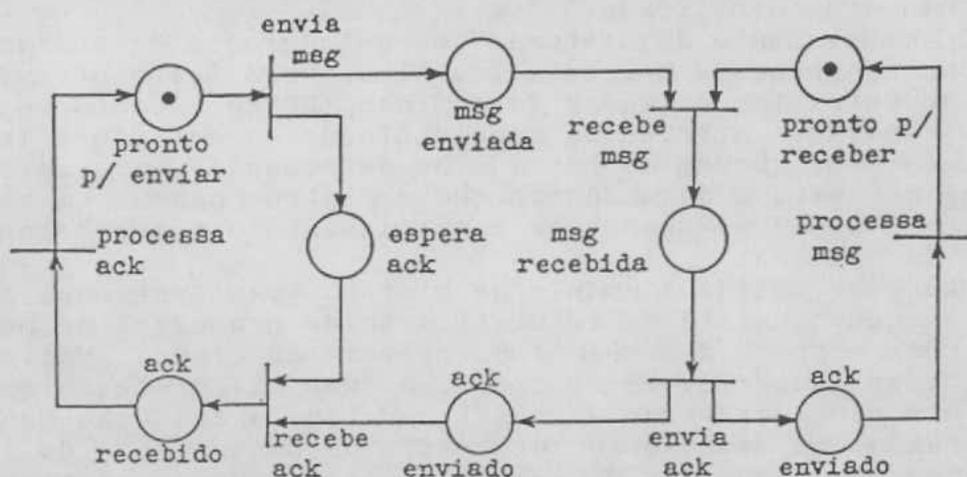


Fig. 1 - Exemplo de uma rede de Petri

No modelamento, os lugares representam condições e as transições, eventos. Este fato pode ser observado na fig. 1, que modela o fluxo de controle de um protocolo de comunicação simples. Um ponto preto, denominado marca, é colocado dentro de um

lugar para indicar a presença daquela condição. Se todas as condições de entrada de uma transição estiverem presentes, diz-se que a transição está habilitada e pode disparar (modelando a ocorrência de um evento com todas as condições satisfeitas). O disparo de uma transição retira as condições que permitiram sua ocorrência, colocando marcas nos lugares de saída, indicando novas condições e, portanto, habilitando outras transições. A fig. 2 ilustra a mesma rede de Petri da fig. 1 após disparo da transição habilitada, correspondente ao evento "envio de msg". Os disparos sucessivos das transições habilitadas na rede corresponde a execução da mesma e é visualizada pela variação no número e na posição das marcas na rede. A essa atribuição de marcas aos lugares a cada instante da execução denomina-se marcação. O estado da rede de Petri é definido pela sua marcação.

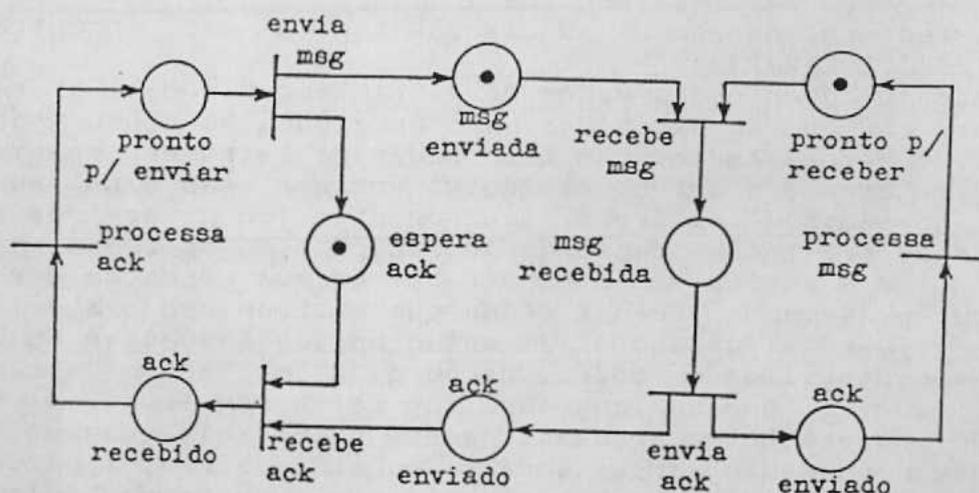


Fig. 2 - Rede de Petri da fig. 1 após disparo da transição correspondente ao evento "envio de msg"

O conjunto de alcançabilidade de uma rede de Petri marcada é o menor conjunto de todas as marcações alcançáveis a partir de uma dada marcação inicial M . Esse conjunto pode não ser finito, ou talvez grande o suficiente para ser analisado. No entanto, constitui-se numa importante ferramenta de análise.

Um lugar numa rede de Petri é seguro se para todas as marcações o número de marcas nesse lugar for menor ou igual a unidade. Um lugar é k-limitado se o número de marcas nesse lugar é menor ou igual a k para o conjunto de alcançabilidade. Um lugar seguro é 1-limitado. Uma rede de Petri é segura se todos os seus lugares forem seguros.

Uma rede de Petri é conservativa se o número de marcas na rede permanece constante.

Outros conceitos, definições, propriedades e formas de representação existem na literatura, não sendo de interesse abordá-los aqui. Sugere-se [PETE77], [DIAZ82], [REIS82], [AGER79].

Muitas extensões foram introduzidas por vários autores em trabalhos subsequentes aos de Petri. Tais extensões surgiram de forma a suprir certas limitações que se tinha quando se desejava aplicar redes de Petri ao modelamento de sistemas reais.

Exemplos de extensões:

- múltiplos arcos entre o lugar e a transição;
- arco inibidor;
- distinção entre marcas colocadas num mesmo lugar;
- adição de predicados associados a transição além da distinção entre marcas.

Por outro lado, restrições são feitas às redes de Petri, criando subclasses das mesmas. Essas restrições acontecem na forma de limitações dos tipos de associações que podem ser feitas entre os lugares e transições da rede. Tais restrições são feitas para permitir a adoção de métodos analíticos. No entanto, isso vem restringir a capacidade de modelamento. Alguns exemplos são:

- máquina de estado;
- redes livres de decisão;
- redes de livre escolha.

Estas extensões e subclasses também são encontradas em [PETE77],[DIAZ82].

Até o advento das Redes de Petri Temporizadas, as redes de Petri, com ou sem extensões, não apresentavam nenhuma dependência do tempo. Assim, com tais redes de Petri era possível descrever apenas a estrutura lógica dos sistemas e não sua evolução no tempo. Além disso, seu conjunto (ou árvore) de alcançabilidade era independente de qualquer noção de tempo, baseando-se única e exclusivamente na rede, na sua marcação e regras de execução da mesma. Se o sistema que estiver sendo modelado pela rede tiver tal dependência, então muitas marcações do conjunto de alcançabilidade podem, na verdade, não serem alcançáveis. Isso sugere que qualquer análise feita sem levar em conta o tempo pode detetar apenas impasses potenciais, uma vez que tal situação pode não ser alcançável no sistema real ([RAZ085]).

Várias extensões que incluem a noção de tempo têm sido propostas por muitos autores, com aplicações variadas. Grande parte dos modelos propostos foram desenvolvidos a partir dos trabalhos de Merlin ("Time Petri Nets") e de Ramchandani ("Timed Petri Nets"), ambos de 1974.

Merlin define rede de Petri temporal (RP temporal) a partir de uma rede de Petri onde cada transição tem dois valores de tempo associados. O primeiro denota o tempo mínimo (t_{min}) que a transição deve permanecer habilitada antes de poder disparar. O segundo, o tempo máximo (t_{max}) que uma transição pode ficar habilitada sem disparar. Nestes casos, convém ressaltar que transições com tempos menores podem disparar antes, desabilitando as de tempos maiores. Tal característica é particularmente útil no modelamento de "time-outs" em protocolos de comunicação. É interessante notar que a RP temporal assim definida contém a rede de Petri no caso especial de t_{min} ser nulo e t_{max} ser infinito. Usando tal definição, Merlin e Farber estudaram problemas de recuperação, projeto e implementação de protocolos de comunicação ([MERL76a], [MERL76b]). Menasche e Berthomieu também possuem trabalhos de análise e verificação de protocolos usando o mesmo modelo ([MENA83]). Depois deles, Roux propôs uma metodologia de modelamento e análise de sistemas distribuídos utilizando o mesmo conceito ([ROUX85]).

Ramchandani introduziu a noção de tempo numa rede de Petri associando atrasos a transições. Esses atrasos são chamados de tempo de disparo ("firing time"). Redes de Petri com tal exten-

são, aqui denominadas Redes de Petri Temporizadas (RPT), têm sido usadas principalmente na avaliação de desempenho ([RAZ085]). Ramamoorthy e Ho usaram esse modelo para a análise de desempenho de algumas classes de redes de Petri ([RAMA80]). Esse trabalho mostrou que o desempenho podia ser analisado eficientemente para redes livres de decisão, uma classe bastante restritiva (cada lugar tem uma transição de entrada e uma de saída - a fig. 3(a) mostra um exemplo e um contra-exemplo). Zuberek usou o mesmo modelo, com o mesmo objetivo, mas com uma subclasse menos restritiva: redes de livre escolha (redes em que cada arco de saída de um lugar é a única saída do mesmo ou a única entrada de uma transição - a fig. 3(b) mostra um exemplo e um contra-exemplo). Fez também algumas extensões introduzindo probabilidade de disparo ("firing probability") no lugar de livre escolha (lugar onde existe o conflito). Introduziu também o tempo como parte da definição de estado da rede, juntamente com a marcação ([ZUBE80]).

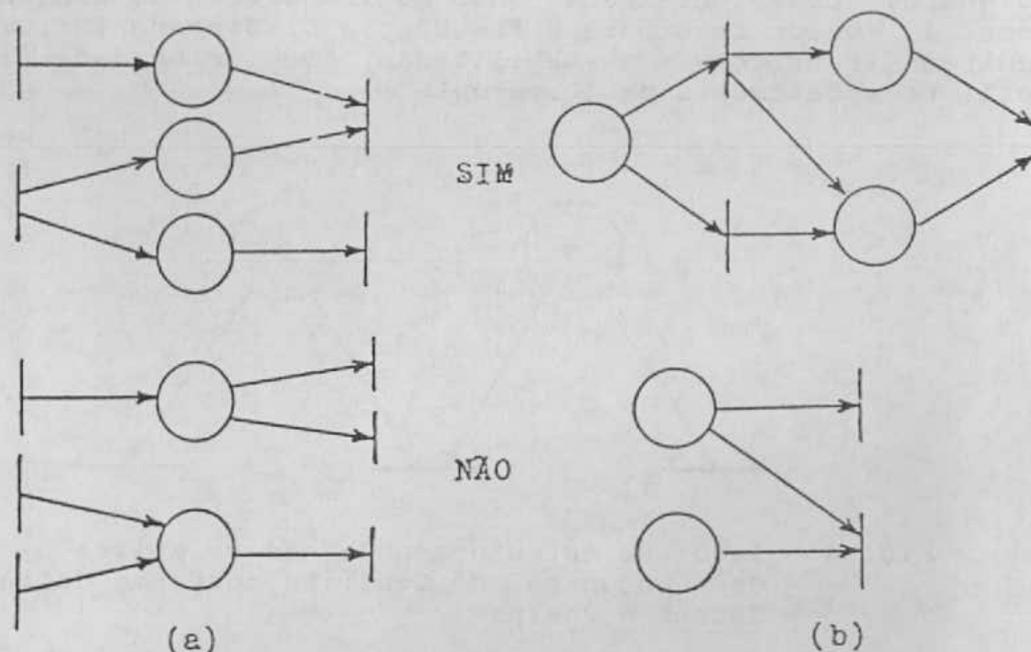


Fig. 3 - Subclasses: (a) rede livre de decisão; (b) rede de livre escolha. Exemplo e contra-exemplo.

Razouk e Phelps criaram outra versão de redes de Petri associando o trabalho de Zuberek com o de Merlin. Uma extensão ao modelo de Zuberek é feita introduzindo tempo de habilitação (como t_{min} do modelo de Merlin), de forma a conseguir modelar "time-outs" também ([RAZ085], [RAZ084]).

Além da adoção do conceito de tempo de habilitação, Razouk e Phelps também relaxaram um pouco as restrições utilizadas no modelo de Zuberek, através da introdução do conceito de conjunto de conflito. Como citado, Zuberek permitia apenas a análise de redes de livre escolha. Neste caso, bastava associar uma probabilidade de disparo a cada arco do lugar de livre escolha. Todas as transições de saída do lugar de livre escolha, por definição, estão habilitadas se uma delas estiver, o que nem sem-

pre é verdade nas transições pertencentes a um conjunto de conflito. Além disto, o disparo de uma transição desabilita as outras. Redes de livre escolha, apesar de menos restritivas que as redes livres de decisão em trabalhos anteriores ao de Zuberek, ainda restringiam bastante o modelamento de sistemas reais. Estrutura do tipo da ilustrada na fig. 3(b) como contra-exemplo de redes de livre escolha é bastante comum acontecer no modelamento de sistemas. Este tipo de estrutura é permitido no trabalho de Razouk e Phelps.

Observe que, neste caso, outros lugares de entrada são permitidos, além do lugar de decisão, numa transição que concorre com outra para disparar. Razouk e Phelps ainda mantiveram a restrição que todas as transições em conflito se desabilitem mutuamente. A fig. 4 mostra uma estrutura não permitida por eles.

Conjunto de conflito é definido como o conjunto de transições potencialmente conflitantes. Para cada transição num conjunto de conflito deve ser definida uma frequência de disparo, cuja soma para todas as transições do conjunto deve ser 1. Valor zero para a frequência de disparo indica que as outras transições, se habilitadas, têm prioridade (conceito útil no modelamento de "time-outs").

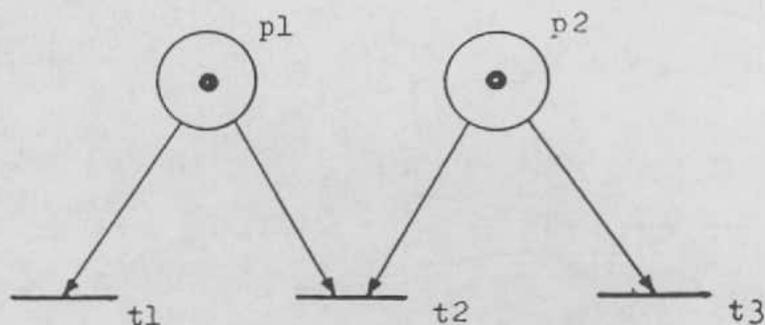


Fig. 4 - Tipo de estrutura onde não se aplica o conceito de Conjuntos de Conflito conforme definido por Razouk e Phelps

Holliday e Vernon ([HOLL87]) foram além em relação ao trabalho de Razouk e Phelps, definindo o que denominaram Rede de Petri Temporizada Generalizada (RPTG), removendo as restrições existentes nas redes analisadas por estes autores. A única restrição mantida foi o fato da rede de Petri ser limitada, de forma a gerar um espaço de estados finito. Outra extensão feita por Holliday e Vernon foi em relação ao tempo e frequência de disparo. Enquanto os modelos de Zuberek e Razouk e Phelps utilizam valores inteiros e independentes do estado, o modelo de Holliday e Vernon permite a utilização de valores reais não negativos ou ainda valores dependentes do estado da rede (p. ex., dependente do número de marcas num lugar). Esses valores também podem ser operadores aritméticos, relacionais ou lógicos. Em seu trabalho, Holliday e Vernon propuseram uma metodologia de cálculo de estimativas de desempenho para qualquer grafo de alcançabilidade para um modelo conforme comentado acima.

Outros modelos que incorporam conceitos de tempo a redes de Petri foram definidos e métodos de análise dos mesmos desenvolvidos, além dos que já foram citados. Podem ser mencionados, ainda, as Redes de Petri Estocásticas (RPEs), definidas por Molloy ([MOLL82],[MOLL85]); Redes de Petri Estocásticas Generalizadas, propostas por Marsan, Balbo e Conte ([MARS84],[MARS86]) ou redes em que o valor de tempo é associado a cada lugar de forma de representar o tempo mínimo que uma dada marca deve permanecer no mesmo ([SIFA77]).

Neste trabalho optou-se por não restringir as classes de redes de Petri a serem analisadas, tampouco os parâmetros associados à mesma.

Pelas necessidades de modelamento que se tem, optou-se partir da rede de Petri acrescida de extensões de acordo com o trabalho de Razouk e Phelps ([RAZ085], [RAZ084]), com as restrições removidas conforme o trabalho de Holliday e Vernon ([HOLL87]), com exceção do fato dos tempos serem valores reais. A extensão introduzida por estes em relação ao tempo e frequência de disparo também serão incorporadas ao modelo. Assim, a rede de Petri temporizada usada para modelar sistemas reais neste trabalho será composta de:

- rede de Petri sem extensões representando a lógica do sistema;
- tempos de disparo associados a cada transição. Esses tempos podem ser valores determinísticos, inteiros não negativos, incluindo zero. Podem, ainda, ser dependentes do estado da rede ou operadores aritméticos, relacionais ou lógicos;
- frequência de disparo associada a cada transição num conjunto de conflito com a probabilidade de disparo calculada durante a análise;
- tempos de habilitação associados a cada transição. A consideração para os valores de tempo é a mesma feita para os tempos de disparo.

Cinco novas extensões vão completar a definição do modelo: a característica de ordenação de marcas num mesmo lugar, a utilização de tempos e frequências dadas por uma função estocástica, a introdução do conceito de Conjuntos de Execução Independente (CEI), a introdução do conceito de Conjuntos de Conflito Composto (CCC) e, por fim, a possibilidade de associação de funções geradoras de marcas a lugares da rede. Estas novas extensões são esclarecidas na sequência.

A lógica do sistema é representada por uma rede de Petri padrão (sem extensões ou restrições). Qualquer estrutura de rede de Petri pode ser utilizada, com a existência ou não de lugares de conflito.

Aos lugares da rede de Petri pode-se associar:

- um número de marcas inicial;
- uma função geradora de marcas.

Tendo sido atribuído um número para cada lugar da rede de Petri tem-se a marcação inicial da mesma, correspondendo ao seu estado inicial, que representa o estado inicial do sistema modelado. A rede de Petri não está restrita apenas a lugares seguros. Um lugar pode ter mais de uma marca, quando então serão enfileiradas de acordo com a ordem de chegada. Esta característica de ordenação de marcas em lugares não seguros representa adequadamente filas dentro do sistema.

A associação de uma função geradora de marcas a um lugar é equivalente a se criar uma fonte de marcas para aquele lugar. Ele poderá possuir outras fontes (que consistiriam em arcos de entrada), ou não. Em geral, no modelamento de um sistema, esta função será usada para gerar marcas em lugares de entrada da rede de Petri, ou seja, aqueles lugares que não possuem arcos de entrada e que, por isso, não estando associado a nenhum elemento do restante do sistema, representam interação com algum outro sistema.

Esta possibilidade permite o modelamento de um sistema grande e complexo através da sua divisão em sistemas menores. Lugares de entrada com funções geradoras de marcas poderiam ser usados para representar a interação entre os vários sistemas, cada qual modelando uma parcela do sistema total.

A necessidade de modelamento de um sistema que faz parte de um sistema maior, cuja interação precisa ser modelada, também pode existir por ser de interesse analisar o desempenho apenas daquela parte do sistema e não dele como um todo.

Esta função pode ser dependente do estado de algum elemento da rede de Petri ou estocástica, de acordo com uma distribuição escolhida.

As transições da rede de Petri pode-se associar:

- Tempo de Habilitação;
- Tempo de Disparo;
- Frequência Relativa de Disparo.

Tempo de Habilitação (TH) é o valor de tempo que a transição deve permanecer habilitada antes de disparar. Ou seja, começa a ser contado a partir do momento que a transição fica habilitada (marcas nos seus lugares de entrada), terminando após transcorrido o valor de tempo, quando então a transição dispara se estiver ainda habilitada. A transição pode ter sido desabilitada durante a contagem do tempo de habilitação caso pertença a algum conjunto de conflito.

THs são usados para a representação de "time-outs" existentes no sistema modelado. Pode se modelar a espera de uma condição (a recepção do reconhecimento de uma mensagem transmitida, por exemplo) enquanto TH é contabilizado. Se a condição não ocorrer até que vença o TH, a transição a ele associada dispara modelando a execução do evento de estouro de "time-out" do sistema modelado.

THs também podem ser usados para fazer com que uma marca permaneça por um tempo mínimo num dado lugar, sendo este tempo individualizado para cada marca. Assim, consegue-se associar um atraso à marca, independentemente da presença de outras marcas no mesmo lugar.

TH pode ser constante ou uma função. Se constante, é dado por um valor inteiro, não negativo, incluindo zero. Valor zero para TH recai no caso da rede de Petri sem extensão. Se função, pode ser dependente do estado de algum elemento da rede de Petri ou estocástica, de acordo com alguma distribuição escolhida.

Tempo de Disparo (TD), por sua vez, é o tempo que a transição leva para disparar. No início do disparo ela retira marcas dos seus lugares de entrada, colocando-as nos seus lugares de saída somente após decorrido este tempo.

TDs são usados para representar o tempo consumido na execução de eventos no sistema modelado. Assim, uma transição em

disparo não dispara novamente enquanto não concluir o primeiro disparo, mesmo que habilitada. TDs são, portanto, contados sequencialmente, nunca em paralelo, para uma mesma transição. Como exemplo, este procedimento modela com perfeição uma fila de tarefas esperando processamento, sendo elas executadas uma a uma, através de uma fila de marcas num mesmo lugar, habilitando uma transição de saída. O tempo de disparo modela o tempo de processamento de cada tarefa, representada pela marca.

TD pode ser constante ou uma função. Se constante, é dado por um valor inteiro, não negativo, incluindo zero. Valor zero para TD recai no caso da rede de Petri sem extensão. Se função, pode ser dependente do estado de algum elemento da rede de Petri ou estocástica, de acordo com alguma distribuição escolhida.

O parâmetro Frequência Relativa de Disparo só se aplica às transições que pertencem a algum conjunto de conflito da rede de Petri. Neste caso, este parâmetro informa a proporção (frequência) que uma transição habilitada do conjunto de conflito dispara em relação às outras transições do mesmo conjunto que estejam habilitadas no mesmo instante. Se não houver nenhuma outra transição habilitada no conjunto naquele instante, ela dispara com probabilidade 1. Da mesma forma, transições que não pertencem a conjunto de conflito disparam com probabilidade 1 quando habilitadas, razão pela qual este parâmetro não se aplica.

Conjuntos de conflito são aqueles nos quais envolve decisão de disparo. As alternativas de disparo são modeladas pela própria estrutura da rede de Petri, representando a lógica do sistema. A decisão de disparo é modelada pelo valor da frequência relativa de disparo associado a cada transição do conjunto de conflito.

No modelo, foram definidos dois tipos de Conjuntos de Conflito (CC): Conjunto de Conflito Simples (CCS) é aquele que atende as restrições da definição de Razouk e Phelps; Conjunto de Conflito Composto (CCC) estende a definição, permitindo estruturas do tipo daquela apresentada na fig. 4 ([MATT89]).

Frequência Relativa de Disparo pode ser constante ou uma função. Se constante, é dado por um valor racional, entre 0 e 1, incluindo os extremos. Valor zero para Frequência Relativa de Disparo significa que outras transições, se habilitadas, têm prioridade. Esta possibilidade é muito útil no caso do modelamento de "time-outs". Se função, pode ser dependente do estado de algum elemento da rede de Petri ou estocástica, de acordo com alguma distribuição escolhida.

Além da associação desses parâmetros comentados aos lugares e transições da rede de Petri, conforme o caso, as transições podem ser reunidas em Conjuntos de Execução Independente (CEI) de acordo com o que se queira modelar. Transições pertencentes ao mesmo CEI nunca estarão em disparo simultaneamente. Transições pertencentes a CEIs distintos podem estar em disparo simultaneamente, desde que o estado do sistema permita.

A associação de transições no mesmo CEI pretende representar sequencialidade entre os eventos modelados por estas transições. Eventos que podem ocorrer de forma paralela no sistema são representados por transições pertencentes a CEIs distintos.

O mesmo recurso poderia ser conseguido com modificações na estrutura da rede de Petri, porém com necessidade de se criar

redes maiores para tal representação.

2.2. Grandezas Observáveis do Modelo

De posse do modelo do sistema, a identificação das grandezas a serem observadas é o segundo passo na metodologia de análise. Para orientar esta identificação, este item descreve as grandezas observáveis no modelo e o que elas podem representar no sistema modelado.

2.2.1. Número de Marcas

Como vimos no item 2.1, a cada lugar da rede de Petri é associado um número de marcas. O número de marcas varia para cada um conforme se executa a rede de acordo com suas regras. A observação deste número de marcas para os lugares da rede transmite duas informações básicas:

- a evolução de estado do sistema;
- presença ou ausência de condição(ões) para a ocorrência de eventos.

A sequência de estados é observada pela evolução na marcação da rede durante a sua execução e, uma vez que a rede é parte do modelo, seus estados coincidem. O estado do modelo por sua vez, retrata o estado do sistema modelado. Assim, a observação da evolução de estado da rede informa a evolução do estado do sistema. A importância desta observação é discutida no item 2.2.2.

A segunda informação fornecida pelo número de marcas é a presença ou ausência de condição(ões) para a ocorrência de eventos. Esta informação vem do fato de uma marca colocada num lugar representar a presença de uma condição para que ocorra o evento representado pela transição de saída deste lugar. A presença de todas as condições para a ocorrência de um evento permite que ele ocorra. Assim, a observação do número de marcas num lugar durante a execução do modelo pode informar:

- se a condição existiu alguma vez;
- o número máximo de vezes que esta condição chegou a ocorrer num certo intervalo de tempo;
- qual o comportamento médio da presença de condição(ões).

Para obter tais informações basta saber dizer, após a execução do modelo, os seguintes valores para um dado lugar:

- número máximo de marcas;
- número médio de marcas;
- comportamento estatístico do número de marcas.

A interpretação destes valores está relacionada àquilo que as marcas e o lugar observado representam em relação ao sistema modelado. Por exemplo, se o lugar representa a existência de uma mensagem a ser transmitida por um protocolo de comunicação e a marca representa uma mensagem, as seguintes interpretações poderiam ser feitas:

- durante a operação do protocolo pode ocorrer uma fila de mensagens esperando transmissão de dimensão igual ao número máximo de marcas observado;
- o tamanho da mesma fila, em média, vai ser igual ao número médio de marcas;
- que confiança pode ser depositada no valor máximo e médio do tamanho da fila, qual a dispersão em torno do valor médio apresentado.

2.2.2. Evolução de Estado

Conforme exposto no item anterior, a observação do número de marcas para todos os lugares do modelo, durante sua execução, informa como o modelo evolui e, por conseguinte, por quais estados passa o sistema que ele representa. O conjunto de todos os estados distintos que o sistema atinge é denominado de conjunto da alcançabilidade.

A importância da observação da evolução de estado está nos seguintes pontos:

- se o modelo atingir uma situação de impasse, saber por quais estados passou antes de chegar àquele correspondente ao impasse;
- saber quais são os estados alcançados pelo modelo.

A interpretação desta observação em relação ao sistema modelado é direta. Uma situação de impasse no modelo corresponde a uma situação de impasse equivalente que pode ser alcançada pelo sistema. Por sua vez, o conjunto de estados alcançados pelo modelo corresponde a um conjunto de estados equivalente que pode ser alcançado pelo sistema. É importante ressaltar que o conjunto de estados alcançados pelo modelo não coincide, necessariamente, com o conjunto de alcançabilidade da rede de Petri a ele associada (rede de Petri obtida a partir do modelo pela extração de todos os parâmetros de tempo e frequência relativa). Isto porque, numa Rede de Petri Temporizada Estendida, os parâmetros acrescentados inserem novas regras de execução que restringem o conjunto de alcançabilidade original, ditado apenas pela estrutura lógica do sistema.

2.2.3. Tempo de Permanência de Marca

Num sistema modelado por uma Rede de Petri Temporizada Estendida, uma marca passa a ser influenciada pelos parâmetros de tempo que regem o modelo. Por exemplo, a presença de várias marcas num lugar de entrada de uma transição com tempo de disparo não nulo faz com que uma seja obrigada a esperar o disparo da outra. Outro exemplo é um tempo de habilitação não nulo, que retarda o disparo da transição, mantendo a marca no seu lugar de entrada durante este tempo. Estes fatores, entre outros, fazem com que uma marca permaneça por um tempo não nulo num dado lugar (tempo decorrido desde o instante de sua chegada ao lugar até o instante de sua saída do mesmo lugar). A observação deste valor de tempo, denominado Tempo de Permanência de Marca, para um lugar durante a execução do modelo, permite obter valores de:

- tempo mínimo de permanência de marca;
- tempo máximo de permanência de marca;
- tempo médio de permanência de marca;
- comportamento estatístico do tempo de permanência de marca.

Da mesma forma que o número médio de marcas, a interpretação dos valores de tempo de permanência de marca está relacionada àquilo que as marcas e o lugar observado representam em relação ao sistema modelado. Tomando como base o mesmo exemplo do item 2.2.1, a interpretação para o tempo de permanência seria o atraso (mínimo, médio, máximo) que uma mensagem sofreria devido à espera para transmissão pelo protocolo.

2.2.4. Tempo de Trecho

Outra grandeza que pode ser observada numa RPTE é o tempo gasto por uma marca para percorrer um certo trecho da rede. Este tempo será não nulo desde que neste trecho exista pelo menos uma transição com tempo de habilitação ou tempo de disparo não nulo. A definição de um trecho para observação pode ser feita entre dois quaisquer elementos da rede de Petri associada a um modelo. No entanto, sem perda de generalidade, neste trabalho trecho será considerado sempre como definido entre dois lugares da rede (um trecho entre dois quaisquer elementos da rede pode ser convertido num trecho conforme considerado pela adição ou subtração do tempo de permanência de marca ou do tempo de disparo, conforme o caso). Tempo de trecho por sua vez, será definido como sendo o tempo decorrido entre o instante de saída da marca do lugar de início do trecho até o instante de chegada da mesma marca no lugar de fim do trecho.

Mediante observação do modelo durante sua execução podem ser obtidos os tempos de trecho mínimo, médio, máximo e o seu comportamento estatístico.

É claro que esta observação pode ser feita para tantos trechos quantos sejam de interesse.

A interpretação dos valores de tempo de trecho vai estar relacionada àquilo que os lugares de início e fim e as marcas retratarem em termos do sistema modelado. Se, por exemplo, a marca representar uma mensagem; o lugar de início, a transmissão no equipamento origem; o lugar de fim, a recepção no equipamento destino; o tempo de trecho vai informar sobre o tempo de trânsito da mensagem entre os dois equipamentos.

2.2.5. Fração de Disparo

A observação do tempo consumido pelos disparos de uma dada transição em relação ao tempo total de execução do modelo informa que parcela deste tempo a transição ficou em disparo. Esta parcela de tempo é definida como Fração de Disparo.

Para transições pertencentes a um mesmo CEI este valor representa que parcela do tempo total de execução foi consumida por aquela transição. Uma vez que, por definição, não há disparos simultâneos no mesmo CEI, a soma das frações de disparo de todas as transições sempre vai ser menor ou igual a 1. No entanto, para um modelo com mais de um CEI, a soma das frações de disparo de todas as transições pode ser maior do que 1.

Uma vez que o disparo de uma transição modela a ocorrência de um evento do sistema, a fração de disparo, tal como definida, pode ser interpretada como a fração de tempo consumida por um evento no sistema em relação ao tempo de operação global. Esta grandeza, portanto, pode ajudar a identificar que eventos no sistema modelado são responsáveis por parcelas significativas em relação ao tempo total e que, por exemplo, merecem um esforço maior de otimização para melhorar o desempenho global. Alternativamente este parâmetro pode avaliar a utilização de recursos de um outro sistema, identificando aqueles que estão ociosos ou com sobrecarga, sugerindo uma redistribuição dos mesmos.

2.2.6. Taxa de Marcas ou de Disparos

Para todos os (as) lugares (transições) de um modelo, durante sua execução, é possível observar o número de marcas (disparos) que passa pelo (ocorre para a) mesmo (a) por dada unidade de tempo. Tal valor é denominado Taxa de Marcas, no caso dos lugares e Taxa de Disparos, no caso das transições.

Sua interpretação, tal qual as outras grandezas, também vai depender do contexto. Em geral, esta taxa vai informar a taxa média de vazão da grandeza do sistema que é representada pelas marcas no modelo. Assim, se as marcas representarem mensagens, o valor observado será a taxa de vazão de mensagens naquele ponto do modelo onde foi feita a observação (lugar ou transição). Se for uma transição que modela a transmissão de uma mensagem, então a taxa será a de mensagens transmitidas por unidade de tempo.

2.2.7. Razão Número de Disparos/Número de Habilitações

A razão número de disparos/número de habilitações, para cada transição do modelo, constitui-se noutra grandeza observável durante a execução do mesmo.

Esta razão sempre vai ter o valor 1 caso a transição não participe de um conjunto de conflito, já que não há nada que a desabilite uma vez que tenha sido habilitada. No entanto, para transições que participam de conjuntos de conflito (simples ou composto), este valor vai informar a taxa com que a transição saiu escolhida dentre aquelas em que foi habilitada.

2.3. Análise do Modelo

Definido um modelo para a representação do sistema e identificadas as grandezas que se quer observar no mesmo, resta apenas analisá-lo extraíndo as grandezas identificadas como importantes. A análise do modelo para observação das grandezas constitui-se na terceira etapa da metodologia.

Se o modelo for simples, a análise é bastante fácil e pode ser feita por pura observação. No entanto, modelos mais complexos em termos de estrutura, ou mesmo modelos simples que incluem funções estocásticas, já se tornam difíceis para serem analisados. Faz-se necessário, então, uma ferramenta que auxilie a análise do modelo. Esta ferramenta foi desenvolvida e é descrita em [MATT89].

A análise feita com auxílio da ferramenta desenvolvida baseia-se na simulação do sistema através da execução do seu modelo. Uma vez que o modelo esteja retratando de maneira fiel o sistema, o comportamento dinâmico do primeiro deve coincidir com o do último. Assim, a observação de grandezas do modelo durante a simulação permite obter informações de desempenho do sistema.

É importante ressaltar que a observação de grandezas no modelo fornecem estimativas de desempenho do mesmo, uma vez que sua execução é simulada. Na simulação, é usual que haja algum desvio nas estimativas em relação ao sistema real. Para atacar este problema, três coisas podem ser feitas:

- tornar o desvio "pequeno" através de uma simulação "longa" o suficiente;

- ter meios de descartar o período transitório, para não influenciar as medidas de um modelo em equilíbrio;
- estimar a variabilidade das estimativas das medidas de desempenho juntamente com a determinação de seu intervalo de confiança.

Para possibilitar a análise a ferramenta deve apresentar:

- a. Uma interface adequada para a entrada do modelo e para a indicação das grandezas que se quer observar e que devem ser fornecidas como resultado;
- b. Uma estrutura adequada de dados para suportar o modelo e a coleta de informações das grandezas durante a simulação, para poder fornecer os resultados solicitados;
- c. Um algoritmo eficiente para execução do modelo, simulando adequadamente a execução do sistema por ele representado;
- d. Meios para variar o tempo de simulação e o tempo transitório e para estudar o comportamento estatístico das grandezas observadas;
- e. Uma interface ou saída adequada para apresentação dos resultados obtidos com a simulação, de acordo com as grandezas que se pediu para observar no início da simulação.

Durante toda a etapa de implementação desta ferramenta de análise, houve a preocupação de que ela fosse prática para utilizar, poderosa na análise e, ao mesmo tempo, flexível para ser aplicável a várias áreas, a vários tipos de problemas.

Esta ferramenta foi denominada de: "Analisador de Desempenho por Simulação de Sistemas Descritos por Redes de Petri Temporizadas Estendidas", de forma a fazer referência à metodologia utilizada. Para simplificar, ela será referenciada resumidamente como "ADREDE" (Nota: além de um acrograma para o nome da ferramenta de análise, o vocábulo "adrede" [ê] é um advérbio significando de propósito, de caso pensado, de estudo, intencionalmente).

A ferramenta é constituída por um programa de análise de mesmo nome e um programa auxiliar, para ser usado após a análise, quando se deseja o cálculo do intervalo de confiança de grandezas, de acordo com um nível de confiança selecionado dentre 10 opções (este programa complementa os recursos necessários para estudar o comportamento estatístico das grandezas do modelo). Este último foi denominado IC-ADREDE. Ambos foram feitos para microcomputadores tipo PC com configuração mínima (memória de 256kB e disco flexível de 5 1/4'') e sistema operacional SISNE Plus ou equivalente.

Foi definida uma formatação adequada de um arquivo de entrada para descrever a estrutura da Rede de Petri associada ao modelo, sua marcação inicial e os Conjuntos de Execução Independente. O restante dos parâmetros que complementam o modelo são fornecidos interativamente através de uma interface amigável. Esta mesma interface permite entrar também com os parâmetros de simulação, bem como selecionar as grandezas que se quer observar e dar início a simulação.

Os resultados da simulação são fornecidos pelo ADREDE de duas formas: interativamente, por uma interface amigável, ou por meio de um arquivo de saída que pode ser observado através de um editor de textos ou simplesmente impresso numa listagem ou na própria tela.

Uma descrição detalhada do ADREDE e IC-ADREDE, bem como dos procedimentos de utilização são encontrados em [MATT89].

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: AGENCIA LOCADORA DE AUTOMÓVEIS

3.1. Descrição e modelamento do sistema

Sistemas em geral com dependência no tempo e cujo comportamento dinâmico se queira estudar são exemplos de sistemas aos quais a metodologia de análise pode se aplicada. Um exemplo desta classe de sistemas é o da Agência Locadora de Automóveis, adaptado a partir do artigo de Sifakis ([SIFA77]). Este sistema foi escolhido como exemplo de aplicação da metodologia neste artigo, para ilustrar a análise de um sistema não seguro e para comparar resultados aqui obtidos com aqueles obtidos por Sifakis. O sistema é descrito na sequência.

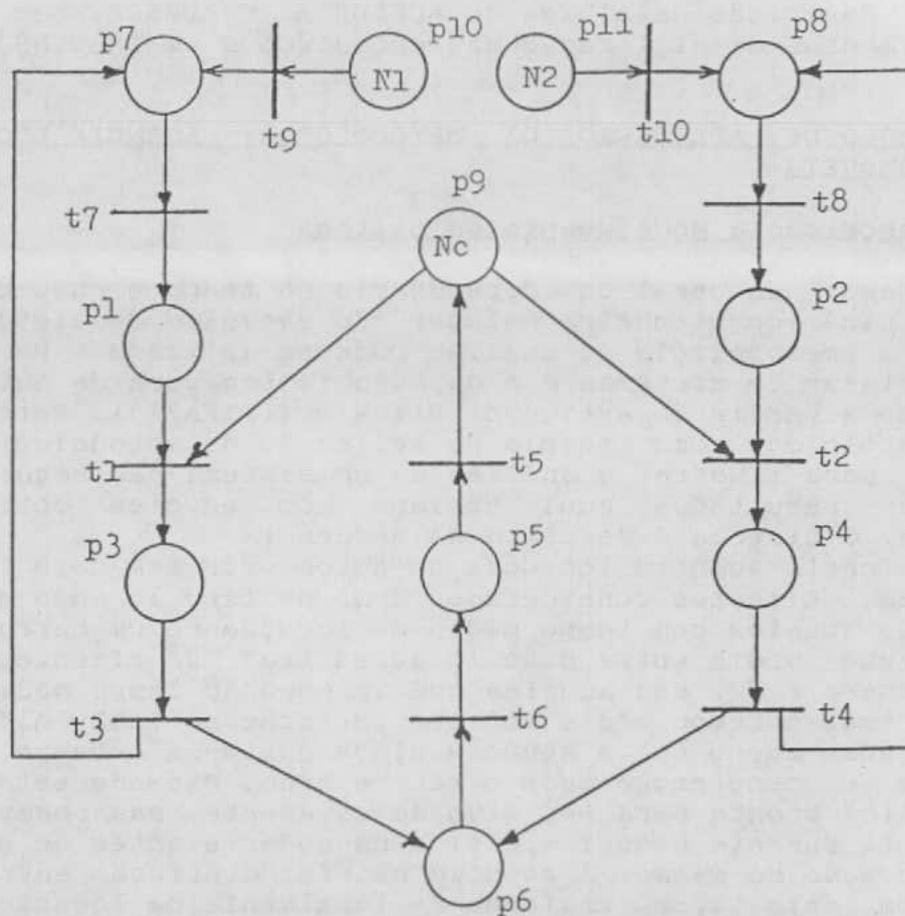
Uma certa agência locadora de automóveis tem dois tipos de clientes. Clientes considerados como de tipo 1, cujo número é N_1 , são aqueles com tempo médio de locação de um carro t_{m1} e com tempo médio entre duas locações t_{e1} . Já clientes tipo 2 cujo número é N_2 , são aqueles que apresentam tempo médio de locação t_{m2} e tempo médio entre duas locações t_{e2} . Além disto, para cada carro que a agência aluga gasta-se o tempo t_m com limpeza e manutenção após o seu retorno. Passada esta fase o carro fica pronto para ser alugado novamente, mas observa-se um tempo t_a durante o qual ele fica na agência antes de ser feita nova locação do mesmo. A agência não faz distinção entre clientes dos dois tipos, tratando-os igualmente na locação de um carro. A agência está preocupada em dimensionar o número de carros necessários (N_c) para atender adequadamente seus clientes.

Para proceder à análise os seguintes valores serão adotados para o sistema, com valores de tempo em horas:

- Número de clientes	$N_1 = 10$	$N_2 = 20$
- Tempo médio de locação	$t_{m1} = 48$	$t_{m2} = 24$
- Tempo entre locações	$t_{e1} = 72$	$t_{e2} = 96$
- Tempo manutenção	$t_m = 6$	
- Tempo na agência	$t_a = 8$	

A fig. 5 apresenta o modelo a ser usado para análise pelo ADREDE.

Observe no modelo que apenas os tempos de habilitação (TH) foram utilizados nas transições t_3 a t_8 , com todos os tempos de disparo deixados nulos. Isto se deve ao fato que dois clientes de mesmo tipo poderem alugar carro simultaneamente, devendo o tempo ser contabilizado em paralelo para ambos. TH é adequado para representar o tipo de comportamento neste caso. Este exemplo mostra uma outra utilização de TH que não a representação de "time-out".



N1, N2, Nc: número inicial de marcas no lugar correspondente

Transição	Tempo Habilit. (h)	Tempo Disparo (h)	Freq. Relat.
t1	0	0	0,50
t2	0	0	0,50
t3	tma1 = 48	0	
t4	tma2 = 24	0	
t5	ta = 8	0	
t6	tm = 6	0	
t7	teal = 72	0	
t8	tea2 = 96	0	
t9	0	Função Expon. 1	
t10	0	Função Expon. 2	

Obs.: - Função Exponencial 1 com média de 72h
 - Função Exponencial 2 com média de 96h

Fig. 5 - Modelo para o sistema "Agência Locadora de Automóveis" alterado adequadamente para evitar "sincronismo" dos clientes

No modelo, os N_c carros disponíveis para locação na agência são representados pelas marcas no lugar p_9 . Os N_1 clientes, pelas marcas no lugar p_7 e os N_2 clientes, pelas marcas no lugar p_8 . A agência não faz distinção entre seus clientes, tendo ambos igual oportunidade de alugar um carro, representado pelas frequências relativas de t_1 e t_2 . Analisando um dos ramos do modelo, uma vez que o outro é idêntico, tem-se: toda marca em p_7 permanece durante o tempo teal (72 h), que é o tempo entre duas locações do cliente. Decorrido este tempo a marca vai para p_1 para alugar um carro. Se houver carro disponível (o que a agência tem interesse em acontecer) ele é alugado, representando pelo disparo de t_1 . Uma marca em p_3 deve aguardar o tempo de habilitação de t_3 , correspondendo ao tempo médio em que o carro permanece alugado (48 h), para depois retornar à agência (marca em p_6) e o cliente a esperar ter nova necessidade de carro (marca em p_7). A marca em p_6 deve esperar o tempo correspondente a TH de t_6 (6h), correspondente à limpeza e manutenção do carro após seu retorno. Depois de limpo, o carro volta à agência, quando aguarda t_a (8h) para ser alugado novamente (TH de t_5).

Por sua vez, os lugares p_{10} e p_{11} e as transições t_9 e t_{10} são utilizadas para inicialização do modelo, de forma a representar adequadamente o sistema. É o que se discute abaixo.

Imagine se as marcas fossem colocadas em p_7 e p_8 , ao invés de p_{10} e p_{11} , respectivamente, na inicialização do modelo. Neste caso, as marcas em p_7 e p_8 começariam a contar o tempo de habilitação (TH) no mesmo instante, ficando sincronizadas, já que a contagem de TH é feita de forma paralela em lugares não seguros. Isto não é desejável como representação do sistema, já que os clientes não chegam todos de uma única vez para alugar carros (o que seria terrível para a agência). Assim, uma melhor representação do sistema é a chegada dos clientes de forma aleatória. A chegada aleatória é conseguida através do tempo de disparo associado a t_9 e t_{10} . Os tempos de disparo associados a estas transições são funções geradoras de valores com distribuição Exponencial, representando a chegada de clientes na agência com o mesmo comportamento. A média dos valores gerados por ambas as funções correspondem ao tempo entre locações dos dois tipos de clientes, arbitrariamente escolhido.

Este tipo de cuidado precisa ser tomado pelo usuário da metodologia, responsável pela elaboração de um modelo adequado para o sistema. Infelizmente, não há uma regra geral para verificar tal adequação. A experiência do usuário e aplicação da metodologia com análise crítica dos resultados é que vão cumprir este objetivo.

3.2. Grandezas a serem observadas

Neste sistema, o interesse da agência é determinar o menor número de carros que atenda a demanda dos clientes. No modelo, esta informação corresponde ao número de marcas inicial no lugar p_9 (N_c). Este é o valor que se quer determinar com a análise. No entanto, para que se possa iniciar a análise, é preciso atribuir um valor para N_c , uma vez que este parâmetro não pode ficar em aberto. Ou seja, este valor não é fornecido diretamente pela análise, mas há artifícios para obtê-lo.

Observe que a situação ótima para a agência é poder ficar sem carro, mas nunca deixar de atender a um cliente que solicitasse alugar um carro. Esta situação corresponde no modelo a valores de Tempo de Permanência de Marca (TP) nulos para p1 e p2 (correspondente a nenhum cliente ter aguardado carro) e a Número de Marcas (NM) poder chegar a ficar nulo em p9 (correspondente a não ter carro parado na agência). Uma vez que não é possível saber de antemão o valor de Nc para o qual tais coisas se verificam, o que se faz é adotar qualquer valor para Nc no início e ir ajustando por simulações sucessivas, de acordo com os resultados obtidos. Por exemplo, TP não nulo em p1 e p2 indica que Nc deve ser aumentado; NM alto em p9 significa que Nc pode ser diminuído. Adicionalmente, é óbvio que Nc nunca precisa ser maior do que a soma de N1 e N2.

Outras grandezas poderiam ser observadas no sistema, de acordo com o interesse da agência, tais como: o número médio e máximo de carros em manutenção no mesmo instante; tempo mínimo, médio e máximo que um carro fica na agência além das 8h de espera normal e 6h de manutenção.

Resumindo o que foi comentado, as seguintes grandezas devem ser observadas durante a análise:

- Tempo de Permanência de Marca em p1, p2 e p9;
- Número de Marcas em p6 e p9;
- Número de Marcas inicial de p9 para o qual o Tempo de Permanência de Marca em p1 e p2 sejam nulos.

3.3. Resultados

De posse do modelo e identificadas as grandezas a serem observadas, pode-se proceder à análise do modelo, o que é feito com auxílio do ADREDE.

O objetivo principal da análise é a determinação de um valor ótimo para Nc, de acordo com os critérios comentados no item 3.2. Uma vez que Nc é um parâmetro de entrada do modelo, ele precisa ser ajustado por simulações sucessivas. Procedendo desta forma foi possível ir se estreitando a faixa onde se encontra o melhor valor para Nc, faixa esta representada pelos três modelos abaixo, cujos resultados serão comparados para ilustrar a escolha final do valor de Nc. Os três modelos correspondem àquele apresentado na fig. 5, diferindo apenas no valor de Nc, ou seja:

- Modelo 1: Número de marcas em p9 (Nc) igual a 11;
- Modelo 2: Número de marcas em p9 (Nc) igual a 12;
- Modelo 3: Número de marcas em p9 (Nc) igual a 13;

Na sequência, são fornecidos os resultados associados às grandezas identificadas no item anterior, extraídos dos arquivos de saída do ADREDE. A fig. 6 apresenta os resultados de tempo de permanência de marca nos lugares p1, p2 e p9; a fig. 7, os resultados de número de marcas em p6 e p9.

MODELO	Valor	Tempo de Permanência de Marca		
		p1	p2	p9
MODELO 1 (Nc=11)	Mínimo	0,0	0,0	0,0
	Médio	4,6	5,0	3,6
	Máximo	22,0	23,0	322,0
MODELO 2 (Nc=12)	Mínimo	0,0	0,0	0,0
	Médio	0,1	0,1	5,8
	Máximo	12,0	13,0	326,0
MODELO 3 (Nc=13)	Mínimo	0,0	0,0	0,0
	Médio	0,0	0,0	10,5
	Máximo	9,0	13,0	454,0

Nota: valores em horas

Fig. 6 - Resultados da grandeza Tempo de Permanência de Marca para os três modelos

MODELO	Valor	Número de Marcas	
		p6	p9
MODELO 1 (Nc=11)	Médio	1,32	0,80
	Máximo	6,00	11,00
MODELO 2 (Nc=12)	Médio	1,38	1,34
	Máximo	4,00	12,00
MODELO 3 (Nc=13)	Médio	1,37	2,41
	Máximo	4,00	13,00

Nota: valores em horas

Fig. 7 - Resultados da grandeza Número de Marcas para os três modelos

Para auxiliar a análise dos resultados e decidir o menor valor de Nc que satisfaz a demanda da agência, analisou-se a dispersão do Tempo de Permanência de Marca em p1 e p2 para os três modelos. Os resultados são apresentados na fig. 8.

Lugar/Valor		Tempo de Permanência de Marca		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
p1	Inferior	4,26	0,04	0,00
	Médio	4,59	0,10	0,03
	Superior	4,93	0,16	0,07
p2	Inferior	4,81	0,05	0,00
	Médio	5,04	0,09	0,02
	Superior	5,27	0,14	0,04

Nota: valores em horas

Fig. 8 - Análise da dispersão da grandeza Tempo de Permanência de Marca nos lugares p1 e p2 dos três modelos para a Agência Locadora de Automóveis (nível de confiança: 95%).

Dos resultados apresentados, a principal conclusão é com relação ao dimensionamento do menor número de carros necessários para atender à demanda dos clientes. Das figs. 6 e 8 pode se concluir que 12 carros já atendem a demanda. Em média os clientes vão ter que esperar alguns minutos pelo carro, mas serão atendidos (observar o intervalo de confiança do Tempo de Permanência de Marca - TP - para p1 e p2, na fig. 8). Um ou outro cliente pode ter que esperar várias horas, mas devido ao comportamento de chegada (veja o valor máximo de TP para p1 e p2, na fig. 6). Observar que o ganho neste aspecto aumentando de 12 para 13 carros não é grande, ou seja, os clientes que esperavam, em média, 6 minutos (0,10h) com 12 carros passam a esperar 2 minutos (0,03h) com 13 carros (fig. 8); além disto, um ou outro cliente vai continuar tendo que aguardar 13h por um carro (fig. 6).

Outras observações feitas levam às seguintes conclusões:

- a fig. 7 apresenta o comportamento do número de carros em manutenção (p6) e à espera de cliente na agência (p9) para cada um dos modelos;
- o tempo que um carro fica na agência é dado pela fig. 6, correspondente ao TP em p9, para cada um dos modelos.

3.4. Comparação do resultado com o de outro método

Sifakis propôs a seguinte expressão para cálculo do valor mínimo de Nc de forma a satisfazer a demanda dos clientes da agência ([SIFA77]):

$$Nc = N1 \frac{(ta + t_{m1} + tm)}{te_{a1} + t_{m1}} + N2 \frac{(t_{m2} + ta + tm)}{te_{a2} + t_{m2}}$$

Os seguintes valores foram adotados para o sistema, com valores de tempo em horas:

- Número de clientes	N1 = 10	N2 = 20
- Tempo médio de locação	tma1 = 48	tma2 = 24
- Tempo entre locações	tea1 = 72	tea2 = 96
- Tempo manutenção	tm = 6	
- Tempo na agência	ta = 8	

Na expressão fornecida por Sifakis calculando o valor de N_c , tem-se:

$$N_c = 11,5 \Rightarrow 12 \text{ carros}$$

Este valor está de acordo com o observado na análise do modelo.

4. Conclusão

O trabalho desenvolveu uma metodologia completa para análise de desempenho que pode ser aplicada a várias classes de sistemas, tais como sistemas distribuídos, protocolos de comunicação, sistemas de tempo real ou sistemas em geral com dependência no tempo.

A metodologia baseia-se na descrição do sistema através de uma Rede de Petri Temporizada Estendida (RPTE), constituindo-se num modelo do sistema, na identificação de grandezas no modelo que forneçam informações de desempenho do sistema e, finalmente, na análise do modelo para observação das grandezas identificadas, consistindo em estimativas de desempenho do sistema.

A metodologia pode ser aplicada em diferentes fases do desenvolvimento de um sistema e para solucionar uma variedade de problemas. Exemplificando:

- na fase de projeto do sistema, para seleção da estrutura adequada dentre várias analisadas;
- na fase de depuração, para orientar a localização do problema, dimensionar a estrutura de dados ou outros parâmetros do sistema;
- na fase de otimização do sistema, para localização das partes que mais consomem tempo em relação ao tempo total ("gargalos"), nas quais maior esforço de otimização deve ser colocado para melhorar o desempenho do sistema; alternativamente, na localização de problemas de falta de sincronismo entre eventos que estejam afetando o desempenho global ou, ainda, na identificação dos eventos que, se executados em paralelo, melhorariam o desempenho do sistema;
- na fase de administração do sistema, para orientar a distribuição de carga em relação aos recursos.

Em resumo, buscou-se desenvolver uma metodologia prática e efetiva no auxílio do desenvolvimento, manutenção e administração de sistemas aos quais a mesma pode ser aplicada. Através da adoção de uma forma de modelamento que se presta para descrever vários tipos de sistemas, tem-se um potencial de aplicação bastante grande.

Referências Bibliográficas

- [AGER79] AGERWALA, T. Putting Petri Nets to Work. *Computer IEEE* 12 (12): 85-94, Dec. 79.
- [BRES85] BRESSAN, Graça. *Ambiente de Programação Distribuída: Definição, Análise e Síntese*. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1985. 321 p.
- [DIAZ82] DIAZ, Michel. Modelling and Analysis of Communication and Cooperation Protocols Using Petri Net Based Models. In: *Protocol Specification, Testing and Verification*. Holanda, North-Holland Publishing Company, IFIP, 1982. p. 465-510.
- [HOLL87] HOLLIDAY, M. A. & VERNON, M. K. A Generalized Timed Petri Net Model for Performance Analysis. *IEEE Trans. on Software Engineering SE-13* (12): 1297-310, Dec. 1987.
- [MARS84] MARSAN, M. A.; BALBO, G.; CONTE, G. A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. *ACM Trans. on Computer Systems* 2 (2): 93-122, May 1984.
- [MARS86] _____. *Performance Models of Multiprocessor Systems*. EUA, MIT Press, 1986. 280p.
- [MATT89] MATTIAS, Hamilton F. de. *Metodologia para Análise de Desempenho de Sistemas de Computação Descritos Através de Redes de Petri Temporizadas Estendidas*. São Paulo, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1989. 614 p.
- [MENA83] MENASCHE, M. & BERTHOMIEU, B. Time Petri Nets for Analyzing and Verifying Time Dependent Communications Protocols. In: *Protocol Specification, Testing and Verification, III*. Holanda, Elsevier Science Publishers B. V., IFIP, 1983. p. 161-72
- [MERL76a] MERLIN, P. M. A Methodology for the Design and Implementation of Communication Protocols. *IEEE Transactions on Communications COM-24* (6): 614-21. June 1976.
- [MERL76b] MERLIN, P. M. & FARBER, D. J. Recoverability of Communication Protocols - Implications of a Theoretical Study. *IEEE Transactions on Communications COM-24* (9): 1036-43, Sept. 1976.
- [MOLL82] MOLLOY, M. K. Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets. *IEEE Transactions on Computers C-31* (9): 913-17. Sept. 1982.
- [MOLL85] _____. Discrete Time Stochastic Petri Nets. *IEEE Transactions on Software Engineering SE-11* (4): 417-23, Apr. 1985.

- [PETE77] PETERSON, J. L. Petri Nets. *Computing Surveys* 9 (3): 223-52, Sept. 1977.
- [RAMA80] RAMAMOORTHY, C. V. & HO, G. S. Performance Evaluation of Asynchronous Concurrent Systems Using Petri Nets. *IEEE Transactions on Software Engineering SE-6* (5): 440-9, Sept. 1980.
- [RAZO84] RAZOUK, R. R. The Derivation of Performance Expressions for Communication Protocols from Timed Petri Net Models. In: *Computer Communication Review* 14 (2): 210-17. ACM SIGCOMM'84, ACM, 1984.
- [RAZO85] RAZOUK, R. R. & PHELPS, C. V. Performance Analysis Using Timed Petri Nets. In: *Protocol Specification, Testing, and Verification, IV*. Holanda, Elsevier Science Publishers B. V., IFIP, 1985. p. 561-77.
- [REIS82] REISIG, Wolfgang. *Petri Nets, An Introduction [Petrinetze]*. Berlin, Springer-Verlag, 1982. 161 p.
- [ROUX85] ROUX, Jean-Luc. *Modelisation et Analyse des Systemes Distribues par les Reseaux de Petri Temporels; These*. Toulouse, Institut National des Sciences Appliquees de Toulouse, 1985. 146p.
- [SIFA77] SIFAKIS, Joseph. Use of Petri Nets for Performance Evaluation. In: *Measuring, Modeling and Evaluating Computer Systems*. Holanda, North-Holland Publishing Company, 1977. p. 75-93.
- [ZUBE80] ZUBEREK, W. M. Timed Petri Nets and Preliminary Performance Evaluation. In: *7th ANNUAL SYMPOSIUM ON COMPUTER ARCHITECTURE*. EUA, IEEE, 1980. p. 88-96.