

UMA VARIANTE DO MODELO LOTOS BÁSICO COM TEMPO ESTOCÁSTICO PARA ESPECIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DISTRIBUÍDOS DEPENDENTES DO TEMPO

MURILO SILVA DE CAMARGO
Depto. Ciências Est. e da Computação
lcmi1msc@brufsc.bitnet

JEAN-MARIE A. FARINES
Lab. de Controle e Micro-Informática - EEL
lcmi1jmf@brufsc.bitnet
Universidade Federal de Santa Catarina
Caixa Postal 476, 88.049 - Florianópolis - SC

Sumário

Neste trabalho é apresentado uma variante da linguagem LOTOS com capacidade para representação de processos dependentes do tempo e viabilidade de realização de estudos de desempenho a partir de especificações. O modelo apresentado possui um forte relacionamento com o modelo Rede de Petri Temporizada Estocástica, a qual associa um intervalo de tempo às transições e variáveis aleatórias aos instantes em que as transições são disparadas. É apresentada uma semântica transicional (operacional à la Plotkin) da linguagem proposta. Um pequeno exemplo é dado (o protocolo do bit alternante) com o fim de ilustrar a aplicabilidade desta variante de LOTOS.

Abstract

In this paper, we present a variant of the specification language LOTOS which allows to describe time-dependent process and to realize performance evaluation from the obtained specifications. The time representation in the proposed model is based on the time semantics of the Time Stochastic Petri Net model; a time interval is associated to each transition and a random variable is associated to the fire transition instant. An operational semantic of the proposed language is presented. To illustrate the proposed model we specify the alternate bit protocol.

1 Introdução

A análise e o estudo do desempenho de um sistema torna necessário o uso de uma especificação formal que compreenda os dois aspectos seguintes:

- um aspecto qualitativo e funcional que consiste em representar os comportamentos, mecanismos e funções desejadas, e no caso de Sistemas Dependentes do Tempo também restrições comportamentais de tempo; e
- um aspecto quantitativo que se refere à descrição de restrições referentes ao desempenho (tempo de realização de um serviço, "delays", etc) e segurança de funcionamento (confiabilidade, disponibilidade, etc).

Existem várias abordagens para especificação e análise formal de sistemas, distinguindo-se principalmente: as **abordagens axiomáticas** que são baseadas em lógicas matemáticas e usadas, principalmente com fins de verificação de propriedades de sistemas (ex.: Lógica de Hoare [35], Lógica Temporal Tempo-Real [28] e a Lógica Tempo-Real [16] etc); e as **abordagens transicionais** em que os modelos são calcados sobre sistemas de transições os quais permitem descrever um sistema computacional através de um sistema de mudanças de estado (estado inicial, transição, estado final). As principais classes de modelos transicionais são: as Máquinas

de Estados Finitos [33]; as Redes de Petri [8, 3]; e as Álgebras de Processos [23, 11, 15, 29].

Escolheu-se como modelo de base uma álgebra de processos tal como definida no modelo utilizado na linguagem de especificação LOTOS [15] a qual é uma variação dos modelos CCS [23] e CSP [14].

Este trabalho visa atender os dois aspectos, já citados, de uma especificação no que se refere ao tempo. Ele objetiva:

1. Viabilizar a representação e tratamento de características da computação tempo-real, tais como *timeouts*, *deadlines*, *delays*, criticismo etc, nesta linguagem.
2. Possibilitar a realização de análise de desempenho a partir de tais especificações.

Para tal é definida uma variante da linguagem LOTOS que inclui a representação do tempo e da probabilidade conforme um modelo semântico próximo ao modelo de Rede de Petri Temporizada Estocástica [17], que será referido a diante como RdP-TE. O modelo proposto será analisado do ponto de vista das representações das características de STR.

A seção 2 apresenta a problemática geral da introdução do tempo e das probabilidades em técnicas de especificação formal. A seguir, na seção 3 é feita uma revisão sobre as extensões existentes de LOTOS que incluem o tempo e/ou probabilidades. A seção 4 apresenta o modelo LOTOS-TE proposto; são apresentados aspectos de sua sintaxe e semântica formal, e suas principais características. A seção 5 apresenta um exemplo de utilização de LOTOS-TE para especificação e realização de um estudo de desempenho do protocolo do Bit Alternante. Finalmente, a seção 7 apresenta nossas conclusões e perspectivas.

2 A Representação do Tempo nos Modelos Formais

Existem duas principais razões para levar em conta o tempo na especificação de sistemas:

1. Representar as restrições de tempo (ex.: *delays*, *deadlines*, *timeouts* etc) em sistemas dependentes deste; e
2. Possibilitar a realização de estudos de desempenho de um sistema a partir desta representação.

O tempo pode ser introduzido de diferentes formas em um modelo para especificação formal:

- ele pode ser representado por **pontos** (como na álgebra de processos SCCS [22]) ou por **intervalos** (como na álgebra de processos *Real Time Agents* [11]).
- ele pode ser definido sobre um conjunto **denso** (ex.: os reais positivos, racionais positivos etc), ou sobre um conjunto **esparso** (ex.: os inteiros positivos). Por exemplo, o modelo LOTOS Temporizado [29] utiliza um modelo de tempo esparso (isomorfo aos inteiros positivos), enquanto o modelo Rede de Petri Temporizada Estocástica [17] utiliza um modelo de tempo denso (sobre os racionais).
- ele pode ainda ter características de **tempo local** ou **tempo global**. No caso de utilizar tempo Global o modelo formal sente sua passagem globalmente em todas as partes de um sistema especificado; isto corresponde a utilização de um relógio global (ex.: LOTOS Temporizado [29]) e é uma característica de modelos formais síncronos [22]. Por outro lado, o tempo é local se diferentes partes da especificação de um dado sistema sentirem a evolução do tempo de maneira independente umas das outras; tudo se passa como se o tempo fosse controlado por vários relógios locais, um para cada parte do sistema especificado (ex.: LOTOS Estendido [9]). Sistemas Distribuídos são mais propriamente representados utilizando um modelo de tempo local [6].
- Em muitos modelos, um intervalo de tempo pode ser associado à realização de uma ação (ou a ocorrência de um evento) que ocorre em algum instante dentro deste intervalo. Da associação ou não de uma variável aleatória, com uma dada função de distribuição de probabilidades, ao instante em que ocorreu a ação (ou disparo de uma transição, no caso das Redes de Petri) no intervalo, resultam duas outras formas de introduzir o tempo: **estocástico** e **não-estocástico**. Os modelos Rede de Petri Estocástica [25] e Rede de Petri Temporizada Estocástica [17] têm um modelo de tempo estocástico; enquanto nos modelos LOTOS Temporizado [29] e Rede de Petri Temporizada [3] o tempo é não-estocástico. O

tempo estocástico é uma característica bastante interessante em um modelo formal visto que com ele pode-se representar na especificação a aleatoriedade de fenômenos físicos e possibilitar a realização de estudos de desempenho com o modelo.

Cada uma destas características é, de alguma forma, mais ou menos apropriada para a representação e o tratamento de Sistemas Distribuídos Dependentes do Tempo.

3 LOTOS e o Tempo

Nesta seção são apresentadas algumas das mais importantes extensões temporais propostas para LOTOS. Extensões temporais de outros modelos algébricos, como RTPA [2], ATP [26], CSP [14], CCS [23] etc, não serão tratados aqui. Em [27] e [31] encontra-se uma revisão bastante atualizada de extensões destes e outros modelos algébricos.

3.1 Uma Introdução a LOTOS

A linguagem LOTOS, "*Language of Temporal Ordering Specifications*" [15], é constituída de duas componentes [19]: uma componente *dados*, que é baseada em Tipos de Dados Abstratos Algébricos conforme definido na linguagem ACT ONE; e uma componente *controle*, cujos princípios têm origem nos modelos CCS [21] e CSP [14]. O conceito de ação interna (ou ação invisível) e a maior parte dos princípios da componente "controle" são baseados no modelo CCS. No entanto, a semântica dada à sincronização entre processos é baseada no conceito de sincronização múltipla ("*multi-way rendezvous*") do modelo CSP, no qual todos os processos que compartilham uma mesma ação (*gate* em LOTOS) devem participar do "*rendezvous*" naquela ação.

A linguagem LOTOS possui uma semântica formal [15] dada em termos do modelo semântico transicional (operacional *à la Plotkin*).

Utiliza-se na literatura o termo LOTOS-básico para fazer referência apenas à parte de controle de LOTOS. A seguir, apresentar-se-á, resumidamente, a sintaxe e a semântica informal dos principais operadores que permitem representar as expressões de comportamento do LOTOS-básico [5].

Inação: Representado pela palavra "stop", denota um processo completamente inativo.

Prefixação de ações: "i;B" e "g;B" que representam, respectivamente, o oferecimento da ação interna "i", seguido do comportamento B, e o oferecimento de uma ação ("gate") "g", seguido do comportamento B.

Escolha: Representado por "B1[]B2", denota um processo que se comporta ou como B1 ou como B2.

Composição paralela: Existem três casos:

- "B1|[g₁, ..., g_n]B2" que representa a sincronização dos processos que oferecem ações em {g₁, ..., g_n};
- "B1 ||| B2" que representa o entrelaçamento ("*interleaving*") das ações de B1 e B2; e
- "B1 || B2" que representa a sincronização completa, isto é o conjunto de ações para sincronização é o conjunto de todas as ações possíveis.

Ocultação ("Hiding"): Denotado por "hide g₁, ..., g_n in B", este operador tem o efeito de transformar ações observáveis de um processo em ações não observáveis.

Instanciação de processo: Representado por "p[g₁, ..., g_n]", onde p é o processo.

Terminação com sucesso de um processo: Representada por "exit".

Composição seqüencial: "B1 >> B2" representa a composição seqüencial de dois processos, B1 seguido de B2.

Desabilitação: Representado por "B1 [> B2]", este operador representa a possibilidade do processo B1 ser desabilitado pelo processo B2.

3.2 Os Modelos LOTOS com Tempo

LOTOS Temporizado LOTOS Temporizado [29] é uma extensão síncrona de LOTOS no qual foi introduzido o tempo através de restrições sobre a ocorrência de eventos.

O tempo em LOTOS Temporizado é discreto, mapeado sobre os inteiros positivos, e global. Ou seja, as expressões de comportamento geram um sistema de transição rotulado, onde os rótulos são eventos temporizados. Os valores associados com um rótulo são contadores de tempo relativos em relação às transições anteriores. Isto equivale a existência de um relógio global implícito no sistema de transição; em consequência, o tempo relacionado com um dado estado pode ser calculado adicionando todos os atributos de tempo do caminho do estado inicial ao estado determinado.

O relógio global é atualizado através de uma função de envelhecimento (ou de passagem de tempo) que atualiza o tempo em cada parte sintática da descrição do comportamento no qual o tempo deve ter passado. Esta função, $Old(t, B)$, tem dois parâmetros, um contador de tempo t e um comportamento B e indica que o comportamento B é t unidades de tempo mais "velha". Esta função é necessária quando duas partes de um mesmo comportamento evoluem de modo independente, e quando elas são entrelaçadas. Esta extensão de LOTOS consiste na introdução de:

1. uma etiqueta de tempo é atribuída a cada evento para indicar o tempo exato em que ele ocorreu; e
2. um construtor de escolha temporal ("Time Choice") que representa a ocorrência de um evento de "time out" em um intervalo de tempo dado.

No cálculo de LOTOS Temporizado, cada evento ocorre em um dado instante do tempo que é representado através da justaposição de um valor numérico. Por exemplo, $a3$ representa o evento a que ocorrerá no tempo 3, se nenhum outro ocorreu anteriormente. No cálculo o operador de prefixação ";" é utilizado para prefixar no tempo uma ação a um comportamento: " $a2; b3$ " representa a ocorrência de a duas unidades de tempo após o instante inicial e a ocorrência de b 3 unidades de tempo após o evento a .

Do ponto de vista da especificação de Sistemas Distribuídos Dependentes do Tempo este modelo possui grandes limitações; por exemplo, o modelo de tempo global não é bem apropriado para especificação de sistemas distribuídos, e o tempo discreto muitas vezes não é adequado à representação do tempo-real. Com relação a análise de desempenho este modelo não possui nenhuma maneira tratamento estocástico das suas especificações.

LOTOS com Ação Temporizada e LOTOS com Interação Temporizada Em [6] são apresentadas duas extensões da linguagem LOTOS em que o tempo é introduzido explicitamente para expressar retardos e intervalos de tempo. Cada uma delas tem como base semântica um dos dois modelos de Redes de Petri com tempo:

- o modelo "Timed-Arc Petri Nets" no qual os arcos de entrada são temporizados (com intervalos de tempo) [6] e que resulta na linguagem *Timed-Action LOTOS*; e
- o modelo "Time Petri Nets" [3]) em que intervalos de tempo são atribuídos às transições (chamado neste artigo de "Time-Transition Petri Nets") que induz a definição da linguagem *Time-Interaction LOTOS*.

Estes dois modelos diferem pelo:

- **Significado dos Intervalos de Tempo - Local versus Global:** Em uma *Timed-Arc PN* a ocorrência de uma sincronização depende da equiparação ("matching") de diferentes intervalos de tempo expressando restrições de tempo locais representadas em cada arco. De modo diferente, a ocorrência de uma sincronização em uma *Time-Transition PN* depende apenas da restrição de tempo representada pelo intervalo de tempo associado à transição; neste caso, é assumido existir um controle global que conhece os limites de cada processo individual.
- **Forma de Disparo de Transições - Possibilidade versus Necessidade:** Enquanto em uma *Timed-Arc PN* uma transição habilitada pode ser ou não disparada (semântica "may"), em uma *Time-Transition Petri Net* uma transição habilitada deve necessariamente ser disparada dentro do intervalo de tempo associado a ela (semântica "must").

O modelo de tempo denso existente em ambos modelos os torna bem adequados à representação do tempo-real. O modelo de tempo local do *Timed-Action LOTOS* o torna bastante

interessante para representação de sistemas distribuídos. Por outro lado, a semântica "must" do Time-Interaction LOTOS torna este modelo expressivo o suficiente para representar situações de *timeouts*. Estes dois modelos não possuem nenhuma possibilidade para realização de estudos de performance em suas especificações.

LOTOS Estendido No modelo apresentado em [9] as principais características da incorporação do tempo em sua extensão de LOTOS são:

- A homogeneidade do tempo no resto da linguagem.
 - O confinamento dos aspectos temporais às partes das especificações que os utilizam. O tempo é local, e influencia apenas as partes da especificação que referem-se às restrições de tempo.
 - A possibilidade de ocultação dos aspectos temporais em uma especificação, de modo que os comportamentos não dependentes do tempo possam ser estudados isoladamente.
- O tempo é discreto e tratado através de temporizadores ("timers"). Um "timer" pode:
- ser inicializado como parte de alguma ação *a*, representado por "*a* : start[*t*](*n*)", onde *n* é o número de unidades de tempo antes do "timeout";
 - ser cancelado como parte de uma ação *a*, representado por "*a* : cancel[*t*]"; ou
 - sinalizar um "timeout" através de um "signal[*t*]", como uma ação independente das outras, pois sua ocorrência não pode estar sujeita a outras restrições de sincronização.

Construtores temporais mais versáteis e abstratos podem ser construídos baseados em temporizadores. Um exemplo da utilização de tais construtores é mostrado no exemplo abaixo [9] que descreve o envio de mensagem e recepção de reconhecimento, com tratamento de "timeout":

```
<send>:start[t](5);
sel <ack>:cancel[t]; ComportamentoNormal[...] (...)
  □ signal[t]; ComportamentoTimeOut[...] (...)
endsel
```

O tempo local deste modelo o torna bastante interessante para descrição de sistemas distribuídos. Porém, o modelo de tempo discreto e a não possibilidade de representar aspectos probabilísticos o impossibilitam de representar algumas características do tempo-real e de realizar estudos de desempenho, respectivamente.

LOTOS Estocástico Em [31] é proposta uma variante de LOTOS, chamada LOTOS Estocástico, obtida adicionando retardos determinísticos de tempo e introduzindo a possibilidade de descrever algum comportamento estocástico. Neste modelo, cada evento *a* tem uma duração que possui um valor determinístico. O comportamento estocástico do sistema é modelado por um operador de escolha probabilística onde cada alternativa da escolha tem uma probabilidade de ocorrência. Este modelo é similar ao modelo de Rede de Petri de Razouk [30], sendo que as únicas diferenças são que em LOTOS Estocástico as ações são instantâneas e a execução paralela de duas ações é modelada por entrelaçamento.

No modelo LOTOS Estocástico o tempo é discreto, relativo, global, dado por pontos, e determinístico. Desta maneira, o modelo de tempo não é muito apropriado nem para especificação do aspecto do tempo em sistemas distribuídos, nem para representação do tempo-real. Porém, LOTOS Estocástico possui a possibilidade de representação de escolhas probabilísticas, o que o torna capaz de realizar estudos sobre o desempenho do sistema especificado. A técnica para realização de estudos de desempenho proposta para este modelo é a realização do cálculo das cadeias de Markov associadas às especificações.

4 O Modelo Proposto

4.1 Introdução

A idéia básica da presente proposta consiste em definir uma variante da linguagem LOTOS com tempo e probabilidade a partir do modelo de Rede de Petri Temporizada Estocástica [17]. Esta proposta foi inspirada em dois trabalhos: um estudo de caso [10] sobre o relacionamento semântico de LOTOS Temporizado [29] e o modelo de Redes de Petri Temporizada (RdP-T)

[24, 3]; e no trabalho de Bolognesi et alli [6], onde os autores estendem a linguagem LOTOS a partir do modelo semântico de RdP-T. O modelo Rede de Petri Temporizada Estocástica (RdP-TE) é uma extensão do modelo RdP-T no qual se associa uma variável aleatória ao instante do disparo das transições. Modificando alguns aspectos da abordagem de Bolognesi, pretende-se obter uma variante do modelo de LOTOS com tempo estocástico, a partir do modelo de rede de RdP-TE, o qual passaremos a nos referir como LOTOS Temporizado Estocástico (LOTOS-TE). Com esta nova abordagem, pretende-se atender aos objetivos fixados no final da seção 1.

4.2 O Modelo de Base: Rede de Petri Temporizada Estocástica

O modelo Rede de Petri Temporizada Estocástica [17] é uma extensão do modelo de RdP-T no qual é adicionada uma função de densidade de probabilidade (*fdp*) F ao instante de disparo de cada transição. Esta *fdp* é definida sobre o intervalo de tempo que é associado à cada transição. Assim, o disparo de uma transição se dá num instante $t_{min} \leq t_{rand} \leq t_{max}$, onde t_{rand} tem F como *fdp*.

Formalmente, uma RdP-TE é definida [17] como uma tripla:

$$RdP-TE ::= \langle RdP, IT_0, F_0 \rangle$$

onde:

- RdP é o modelo de Rede de Petri ordinária subjacente;
- $IT_0: T \mapsto Q^+ \times Q^+$, onde T é o conjunto de transições e para cada transição t_i :
 $t_i \rightarrow IT_i = [a_i, b_i]$ com $0 \leq a_i \leq b_i$
 $\forall i, 1 \leq i \leq n$ com $n = Card(T)$;
- $F_0: T \mapsto \mathcal{F}^+$, onde \mathcal{F}^+ é o conjunto das funções não-negativas e para cada transição t_i :

$$t_i \rightarrow f_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \notin [a_i, b_i] \\ \geq 0 & \text{se } x \in [a_i, b_i] \end{cases}$$

$$\forall i, 1 \leq i \leq n, \text{ e } \int_{a_i}^{b_i} f_i(x) dx = 1$$

IT_0 é a função de intervalo de disparo inicial (Q^+ é o conjunto dos números racionais não-negativos), onde cada IT_i é um intervalo do tipo $[t_{min}, t_{max}]$. E F_0 é a função de densidade de probabilidade de disparo. Quando a rede evolui, os intervalos associados às transições variam e o conjunto das *fdp* F torna-se também dinâmico [17].

Um exemplo de uma RdP-TE é mostrado na figura 1 associando *fdps* às transições. Neste exemplo, as funções $f_1(x)$, $f_2(x)$, e $f_3(x)$ são definidas sobre os intervalos de disparo das transições t_1 , t_2 , e t_3 , respectivamente¹. Observe-se que são utilizados pulsos de Dirac para representar a probabilidade de disparo das transições nas extremidades dos intervalos limitados.

Em uma RdP-TE os estados são triplas $S = (M, IT, F)$, onde: M é a função de marcação corrente; IT é a função intervalo de disparo corrente associando com cada transição habilitada na rede o intervalo de tempo no qual a transição pode ser disparada; e F é uma *fdp* associando a cada transição com um intervalo de disparo não-vazio, uma distribuição de tempo f . O cálculo do próximo estado em uma RdP-TE é baseado na seguinte regra de disparo; é possível disparar uma transição t no tempo θ , a partir de um estado $S = (M, IT, F)$, se e somente se as três condições seguinte são satisfeitas:

1. a transição t está habilitada pela marcação M ;
2. o tempo θ deve ser maior ou igual ao tempo mínimo de disparo (t_{min}) da transição t e menor ou igual ao menor dos tempos máximos de disparo (t_{max}) de todas as transições habilitadas por M ; e
3. a probabilidade de disparo da transição t antes de, ou em θ é diferente de zero.

O próximo estado $S' = (M', IT', F')$ que é obtido a partir de S pelo disparo de t no instante θ , é calculado através do seguinte algoritmo:

¹Embora as três *fdps* definidas na figura 1 sejam exponenciais negativas, pode-se, em RdP-TE, associar quaisquer outras *fdps* aos intervalos de tempo das transições.

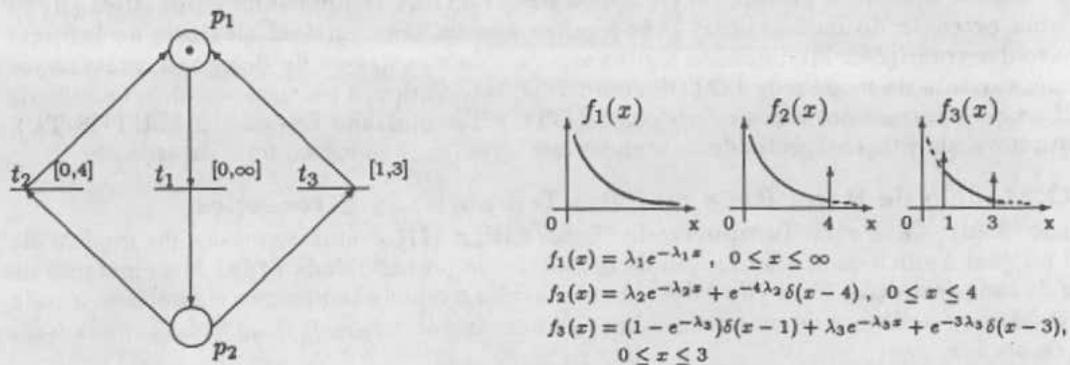


Figure 1 : Exemplo de uma RdP-TE [32]

1. A nova marcação M' e o novo intervalo de disparo IT' obtidos do disparo da transição t no tempo θ é calculado da seguinte forma:

(a) A nova marcação M' é obtida como nas RdPs ordinárias.

(b) A nova função de intervalo de tempo IT' é definida como:

- para todas transições t_i não habilitadas pela marcação M' , IT' é vazia;
- para todas transições t_i habilitadas pela marcação anterior M e não em conflito com a transição t

$$IT'_i = [\max(0, t_{i, \min} - \theta), t_{i, \max} - \theta];$$

- todas outras transições t_i (isto é, as transições t_i novamente habilitadas pela marcação M') recebem seus intervalos de disparo originais.

2. A nova função de densidade de probabilidade F' é calculada para cada transição habilitada pela nova marcação M' da seguinte maneira:

(a) Para todas as transições t_k habilitadas pela marcação M e não em conflito com a transição t então:

$$f'_k(x) = \begin{cases} \frac{f_k(x+\theta)}{1-\Gamma_k(\theta)}, & t'_{\min}{}^k \leq x \leq t'_{\max}{}^k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde $\Gamma_k(\theta)$ é a probabilidade acumulada de $f_k(x)$ no intervalo $[0, \theta]$.

(b) Para todas as transições que foram agora habilitadas por M' , as funções de densidade de probabilidade são colocadas em seus valores iniciais.

Na regra de disparo, a origem do tempo para θ é a data no qual o estado S é atingido. Assim, um tempo relativo é usado dentro de cada estado. Como a escala de tempo é densa e geralmente θ pode variar dentro de um intervalo $[a, b]$, com $a \leq b$, pode existir um número infinito de instantes de disparo θ para uma dada transição t . Considerando este fato, criou-se o conceito de *grafo de classes de estados* [3] para possibilitar o desenvolvimento de técnicas de análise para o modelo RdP-T (e também para RdP-TE). Neste grafo, cada classe de estado agrupa os estados com uma mesma marcação M , e um domínio de disparo da classe o qual é definido como a união dos intervalos de disparo associados a cada estado da classe.

O modelo RdP-TE permite representar com muita "fidelidade" a aleatoriedade dos fenômenos físicos reais, o que é particularmente útil para estudos de desempenho em sistemas.

A partir do modelo RdP-TE vem sendo realizados estudos de desempenho de sistemas através da estimação de tempos médios de ciclos calculados sobre o grafo de classe de estado probabilizado [17]; isto permite obter inferência a respeito do comportamento médio de um sistema.

RdP Temporizada Estocástica	⇒	LOTOS Temporizado Estocástico
Lugares com fichas	⇒	Estados de processos
Transições	⇒	Ações/ Eventos
Uma transição "a" com 2 ou mais arcos de entrada	⇒	Uma ação "a;..." em dois ou mais processos e uma composição paralela "[[a]]" deles com sincronização na ação a
Um intervalo de tempo associado à uma transição	⇒	Um intervalo de tempo associado à ocorrência de uma ação
Uma f.d.p. F associada ao tempo do disparo da transição	⇒	Uma f.d.p. F associada ao tempo de ocorrência de uma ação

Table 1 : Correspondências entre RdP-TE e LOTOS-TE

4.3 A Proposta de Extensão de LOTOS com Tempo e Probabilidade

Em consequência dos objetivos fixados anteriormente, orientamos a escolha do modelo proposto de maneira a satisfazer os seguintes requisitos:

- Possibilitar o quanto possível a representação e tratamento de características de Sistemas de Tempo Real.
- Possuir um poder de expressão suficiente para representação de *timeouts*, *deadlines*, e outros comportamentos dependentes de restrições de tempo.
- Possibilitar a representação dos conceitos necessários para realização de estudos de desempenho [4]: tempo estocástico, escolha probabilística, e recursos.

4.4 Justificativas da Escolha da Linguagem LOTOS e do Modelo RdP-TE como Base

A proposta de extensão de LOTOS com tempo e probabilidade é fundamentada em duas bases teóricas:

1. O modelo LOTOS Básico [15]; e
2. O modelo RdP-TE [17];

A escolha de LOTOS deve-se principalmente ao fato de LOTOS ser uma linguagem de especificação padronizada pela ISO que vem sendo a cada dia mais utilizada; além de possuir propriedades interessantes do ponto de vista da análise.

Por outro lado, a opção pelo modelo RdP-TE como modelo subjacente a LOTOS-TE deve-se a duas características importantes deste modelo: o seu poder de expressão suficiente para representação de restrições de tempo e comportamentos temporais, como: *timeouts*, *delays*, etc; e a possibilidade existente de realização de estudos de desempenho a partir da utilização de funções de densidade de probabilidade associadas às transições.

A tabela 1 apresenta as relações (ou as correspondências) propostas entre o modelo LOTOS-TE e o modelo RdP-TE.

O processo

$$P[t_1, t_2, t_3] := t_1 f_1 < 0, w >; (t_2 f_2 < 0, 4 >; P[t_1, t_2, t_3] [] t_3 f_3 < 1, 3 >; P[t_1, t_2, t_3])$$

mostra um exemplo na sintaxe de LOTOS Temporizado Estocástico do exemplo da RdP-TE da figura 1 utilizando as correspondências indicadas na tabela 1. As f.d.p. associadas aos intervalos de tempo de ocorrência das ações no modelo de LOTOS são as mesmas do modelo de RdP.

4.5 Aspectos Sintáticos e Semânticos

Aspectos Sintáticos A sintaxe básica de LOTOS-TE será a mesma definida na norma [15] acrescida das modificações introduzidas em [29] para representação de intervalos de tempo no LOTOS Temporizado. Porém, identificaremos a função de densidade de probabilidade associada à uma ação *a* através de um nome f_a justaposto à esta ação.

Para a definição da sintaxe de LOTOS-TE considere-se a notação que é descrita a seguir. Os B_i 's representam expressões de comportamento. Os t_i 's representam o tempo. T representa intervalos de tempo do tipo $\langle t_{min}, t_{max} \rangle$. Os f_i 's representam funções de densidade de probabilidade definidas sobre os intervalos de tempo T . Os g_i 's representam ações. a_i 's denotam eventos (o conjunto de ações mais o evento "i"). A representam conjuntos de ações. $a f T$ representam classes de eventos temporizados estocásticos.

A sintaxe proposta inicialmente para LOTOS-TE é apresentada na tabela 2.

Nome	Sintaxe	$L(B) =$ Conjunto de Ações de B
Inaction	<i>stop</i>	\emptyset
Action Prefix	$a f T; B$	$L(B) \cup \{a\}$
Choice	$B_1 \square B_2$	$L(B_1) \cup L(B_2)$
Parallelism	$B_1 \parallel [g_1, \dots, g_n] B_2$	$L(B_1) \cup L(B_2)$
Hiding	<i>hide</i> g_1, \dots, g_n <i>in</i> B	$L(B) - \{g_1, \dots, g_n\}$
Process	$P := B$	$L(B)$
Relabeling	$B[g_1/g'_1, \dots, g_n/g'_n]$	$(L(B) - \{g'_1, \dots, g'_n\}) \cup \{g_1, \dots, g_n\}$

Table 2 : Tabela sintática de LOTOS-TE

Aspectos Semânticos A definição semântica precisa do novo modelo é um dos aspectos mais críticos do trabalho proposto. A semântica que passamos a definir para LOTOS-TE tenta ser a mais próxima possível daquela do modelo de RdP-TE [17].

A semântica de LOTOS-TE é definida através de um sistema de transições rotuladas. Para um dado comportamento B é definido um sistema de transições rotulado

$$ST = \langle S, AFT, TR, s_0 \rangle$$

onde:

- S é o conjunto de estados possíveis.
- $AFT = \{a f_a^0 I_a^0 : a \in L(B) \cup \{i\}\}$ é o conjunto dos eventos estocásticos temporizados possíveis, e onde I_a^0 e f_a^0 são definidos como:

$I_a^0 : L(B) \mapsto Q^+ \times Q^+$ é a função de intervalos iniciais, que para cada ação a associa um intervalo I_a , isto é:

$$a \rightarrow I_a = [t_{min}^a, t_{max}^a] \text{ com } 0 \leq t_{min}^a \leq t_{max}^a$$

$\forall a \in L(B); e$

$f_a^0 : L(B) \mapsto F^+$ é a função de *fdp*'s iniciais, que para cada ação a associa uma *fdp* f_a , isto é:

$$a \rightarrow f_a(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \notin [t_{min}^a, t_{max}^a] \\ \geq 0 & \text{se } x \in [t_{min}^a, t_{max}^a] \end{cases}$$

$\forall a \in L(B), e \int_{t_{min}^a}^{t_{max}^a} f_a(x) dx = 1$

- $TR = \{ \xrightarrow{a p_\theta} : \xrightarrow{a p_\theta} \subset S \times S, \langle B_1, B_2 \rangle \in \xrightarrow{a p_\theta} \text{ sse } a p_\theta \text{ for uma instância de } a f_a I_a, \text{ isto é, } B_1 \xrightarrow{a p_\theta} B_2 \text{ e } \theta \in I_a \text{ e } p_\theta = \int_{t_{min}^a}^\theta f_a(x) dx \}$.

- $s_0 = B$ é o estado inicial.

OS OPERADORES:

INACTION: *stop*.

ACTION PREFIX: $a f_a I_a; B \xrightarrow{a p_\theta} B$.

CHOICE:

$$\frac{B \xrightarrow{a p_{\theta_1} \theta_1} B', t_{min}^a \leq \theta_1 \leq LFT}{B \parallel C \xrightarrow{a p_{\theta_1} \theta_1} B'} \quad \frac{C \xrightarrow{b p_{\theta_2} \theta_2} C', t_{min}^b \leq \theta_2 \leq LFT}{B \parallel C \xrightarrow{b p_{\theta_2} \theta_2} C'}$$

Onde: $I_a = [t_{min}^a, t_{max}^a]$, $I_b = [t_{min}^b, t_{max}^b]$ e LFT é o menor dos máximos de I_a e I_b , isto é, $LFT = \min\{t_{max}^a, t_{max}^b\}$.

PARALLEL: (Sincronização e Entrelaçamento)

1. Sincronização:

Regra básica: Dois comportamentos podem se sincronizar em uma ação "a", se as duas condições seguintes forem satisfeitas:

- se os dois comportamentos puderem sincronizar em "a" no sentido convencional de LOTOS; e
- se os intervalos de tempo e as *fdp*'s definidas sobre "a", em ambos comportamentos, forem idênticos.

A ação de sincronização, realizada pelo comportamento composto, é observada como a realização de uma única ação num único instante de realização.

Seja A um conjunto de classes de ações, então a regra da sincronização é dada por:

$$\frac{B \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} B', C \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} C'}{B \parallel [A] \parallel C \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} B' \parallel [A] \parallel C'} \quad \text{sse } a f_a I_a \in A$$

Onde $\theta \in I_a$ e $p_{\theta} = \int_{t_{min}^a}^{\theta} f_a(x) dx$.

2. Entrelaçamento:

O entrelaçamento representa a evolução independente de duas partes onde uma evolui e a outra permanece no mesmo estado. O Comportamento que evolui deve indicar o tempo àquele que permanece inativo (realizado por *Old*).

$$\frac{B \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} B', ((C \xrightarrow{a' p_{\theta'} \theta'} C' \text{ and } t \leq t') \text{ or } C \nrightarrow)}{B \parallel [A] \parallel C \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} B' \parallel [A] \parallel Old(t, C)} \quad \frac{C \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} C', ((B \xrightarrow{a' p_{\theta'} \theta'} B' \text{ and } t \leq t') \text{ or } B \nrightarrow)}{B \parallel [A] \parallel C \xrightarrow{a p_{\theta} \theta} Old(t, B) \parallel [A] \parallel C'}$$

Onde $a \notin A$, e " $B \nrightarrow$ " significa a impossibilidade de evolução do comportamento B .

OLD: Realiza a atualização do tempo relativo de um comportamento (ele serve como função auxiliar para o entrelaçamento). Sua regra semântica é:

$$\frac{B \xrightarrow{a p_t t} B', t \geq \theta}{Old(\theta, B) \xrightarrow{a p_{(t-\theta)} (t-\theta)} B'}$$

Além disso, associa-se também ao operador "Old" a função de atualizar o intervalo I_a (para I'_a) e a função f_a (para f'_a), de maneira idêntica ao que é feito no modelo RdP-TE [17]. Isto é:

- O novo intervalo associado à ação "a" "envelhecida" por um tempo $\theta \leq t_{max}^a \in I_a = [t_{min}^a, t_{max}^a]$ é dada por:

$$I'_a = [\max(0, t_{min}^a - \theta), t_{max}^a - \theta].$$

2. A nova $f_{dp} f'_a$ associada ao novo intervalo $I'_a = [t'_{min}, t'_{max}]$ é dada por

$$f'_a(x) = \begin{cases} \frac{f_a(x+\theta)}{1-\Gamma_a(\theta)}, & t'_{min} \leq x \leq t'_{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde $\Gamma_a(\theta)$ é a probabilidade acumulada de $f_a(x)$ no intervalo $[0, \theta]$.

Outros operadores, tais como HIDING, PROCESS, RELABELING, etc, não apresentam grandes problemas para definição e podem ser assumidos de forma análoga ao que foi definido nos modelos em [29] e [6], porém acrescentando-lhes os intervalos de tempo e as f_{dp} às ações.

5 Um Exemplo

Nesta seção é desenvolvido um exemplo de uma especificação em LOTOS-TE com o objetivo de constatar as potencialidades que o modelo oferece para representar sistemas e ser utilizado para avaliação de desempenho. O protocolo do Bit Alternante é usado como exemplo. Apresenta-se a especificação em LOTOS-TE e em seguida uma especificação equivalente deste protocolo em Rdp-TE. E finalmente, esta última especificação é analisada por uma ferramenta, desenvolvida para Rdp-TE, que geram alguns resultados preliminares relativos ao comportamento e desempenho deste protocolo.

O protocolo do Bit Alternante é uma disciplina simples de troca de mensagens entre uma origem e um destino, conectados por um meio de transmissão que pode perder as mensagens que lá transitam. Neste protocolo, a troca de mensagens é regida pelas disciplinas de emissão e recepção, descritas a seguir. A cada mensagem que o emissor recebe do ambiente, para ser expedida, ele concatena um bit adicional com o valor 0 ou 1, alternadamente; o receptor recebe a mensagem e reenvia o valor do bit concatenado como reconhecimento, o emissor espera durante um certo tempo fixado o reconhecimento: se ele chega, o emissor fica pronto para enviar outra mensagem alternando o valor do bit, senão o emissor supõe que a mensagem foi perdida e a retransmite.

Para simplificar o exemplo, escolhemos valores numéricos inteiros adequados para representar os tempos gastos nas diferentes ações do protocolo. Por exemplo, o valor utilizado para representar o tempo gasto na ação de colocar uma mensagem na linha de comunicação que é de no máximo 8 unidades, e a duração da colocação de um reconhecimento na linha que é de no máximo 2 unidades de tempo; o tempo devido aos retardos da linha de comunicação é considerado como sendo de no máximo 10 unidades de tempo; o valor atribuído aos temporizadores é de 31 unidades de tempo, isto é, superior a soma dos tempos de envio de uma mensagem e recepção do seu reconhecimento.

```

specification BIT_ALTERNANTE
  [sm0,sm1,ra0,rai,rm0,rea0,real,rm1,sa0,sai,to0,to1,lm0,lm1,la0,la1]:noexit
behavior

  ( EMISSOR[to0,sm0,ra0,to1,sm1,rai] ||| RECEPTOR[rm0,sa0,rea0,rm1,sai,real] )
  | [to0,to1,sm0,sm1,ra0,rai,rm0,rm1,sa0,sai] |
  MEIO[to0,sm0,rm0,sa0,ra0,lm0,la0,to1,sm1,rm1,sai,rai,lm1,la1]

where
process EMISSOR[toi,smi,rai,toj,smj,raj]: noexit :=
  smi EXP<0,w>;
  ( toi UNI<31,31>;EMISSOR[toi,smi,rai,toj,smj,raj] )
  □
  ( rai UNI<0,10>;smj EXP<0,w>;
    ( toj UNI<31,31>;EMISSOR[toj,smj,raj,toi,smi,rai] )
    □
    ( raj UNI<0,10>;EMISSOR[toi,smi,rai,toj,smj,raj] )
  )
endproc
process RECEPTOR[rmj,saj,raej,rmj,saj,raej]: noexit :=
  ( rmj UNI<0,18>;saj UNI<0,2>;

```

```

    ( rmj UNI<0,18>;saj UNI<0,2>; RECEPTOR[rmj,sai,reaj,rmi,sai,rei]
    □
      rmi UNI<0,18>;rei UNI<0,18>; RECEPTOR{rmj,saj,rei,rmj,saj,rei} )
    □
    ( rmj UNI<0,18>;reaj UNI<0,18>;RECEPTOR[rmj,sai,reaj,rmj,saj,rei] )
endproc
process MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj]:noexit:=
(
  smi EXP<0,w>;(lmi UNI<0,18>;toi UNI<0,31>;
  MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj]) □
  (rmi UNI<0,18>;MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj])
)
□
(
  smj EXP<0,w>;(lmj UNI<0,18>;toj UNI<0,31>;
  MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj]) □
  (rmj UNI<0,18>;MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj])
)
□
(
  sai UNI<0,2>;(lai UNI<0,10>;toi UNI<0,31>;
  MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj]) □
  (rai UNI<0,10>;MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj])
)
□
(
  saj UNI<0,2>;(raj UNI<0,10>;toj UNI<0,31>;
  MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj]) □
  (raj UNI<0,10>;MEIO[toi,smi,rmi,sai,rai,lmi,lai,toj,smj,rmj,saj,raj,lmj,laj])
)
endproc
endspec

```

Nesta especificação foram utilizados os valores de tempo dados anteriormente e atribuídas as seguintes distribuições de probabilidades às transições:

- exponenciais negativas definidas sobre os intervalos $< 0, w >^2$ são referidas na especificação por EXP; e elas são usadas no exemplo para as ações sm0 e sm1
- distribuições uniformes definidas sobre os intervalos de tempo associados a cada uma das outras ações, as quais são referidas genericamente na especificação por UNI.

Os significados dos nomes atribuídos as ações no exemplo são dadas a seguir: smi denota o envio de uma mensagem i; rmi denota a recepção de uma mensagem i; sai denota o envio de um reconhecimento i; rai denota a recepção de um reconhecimento i; rei denota o reenvio de um reconhecimento i; toi denota o reenvio de uma mensagem i; lmi denota a perda de uma mensagem i; e lai denota a perda de um reconhecimento i. A letra "i" nos nomes representa o valor de um contador módulo 2.

Apresentamos na figura 2 uma RdP-TE com comportamento equivalente à especificação LOTOS-TE dada acima, com os mesmos nomes de transições (ações), os mesmos intervalos, e as mesmas fdp's.

A partir da RdP-TE da figura 2 utilizou-se uma ferramenta computacional desenvolvida para RdP-TE, o ARP, para obter uma análise do comportamento e do desempenho do protocolo. O ARP - Analisador/ Simulador de Redes de Petri desenvolvido no LCMI-UFSC [20], possibilita a realização de uma análise das principais propriedades da rede, bem como a realização de estudos de desempenho, tais como obtenção de tempos médios de realização de ciclos, média de marcações, etc.

A enumeração dos estados acessíveis, obtidos pelo ARP, é mostrado em seguida. Os Ci's representam as classes de estados, e os D's representam os domínios de disparo das transições habilitadas pela marcação.

²A letra w denota a especificação de uma quantidade arbitrariamente grande.

Enumeracao de estados: rede Bitalt. Intervalos omitidos significam [0,0].
 Estados acessiveis pela rede:

C0	:{r0, s0}	D:{sm0[0,32000]}
C1	:{r0, m0, w0}	D:{to0[31], rm0[0,18], lm0[0,18]}
C2	:{a0, w0}	D:{to0[13,31], sa0[0,2]}
C3	:{ack0, r1, w0}	D:{to0[11,31], ra0[0,10], la0[0,10]}
C4	:{r1, s1}	D:{sm1[0,32000]}
C5	:{m1, r1, w1}	D:{to1[31], rm1[0,18], lm1[0,18]}
C6	:{a1, w1}	D:{to1[13,31], sa1[0,2]}
C7	:{r0, ack1, w1}	D:{to1[11,31], ra1[0,10], la1[0,10]}
C8	:{r0, w1}	D:{to1[1,31]}
C9	:{r0, m1, w1}	D:{to1[31], rea1[0,18], lm1[0,18]}
C10	:{r0, w1}	D:{to1[13,31]}
C11	:{r1, w1}	D:{to1[13,31]}
C12	:{r1, w0}	D:{to0[1,31]}
C13	:{m0, r1, w0}	D:{to0[31], rea0[0,18], lm0[0,18]}
C14	:{r1, w0}	D:{to0[13,31]}
C15	:{r0, w0}	D:{to0[13,31]}

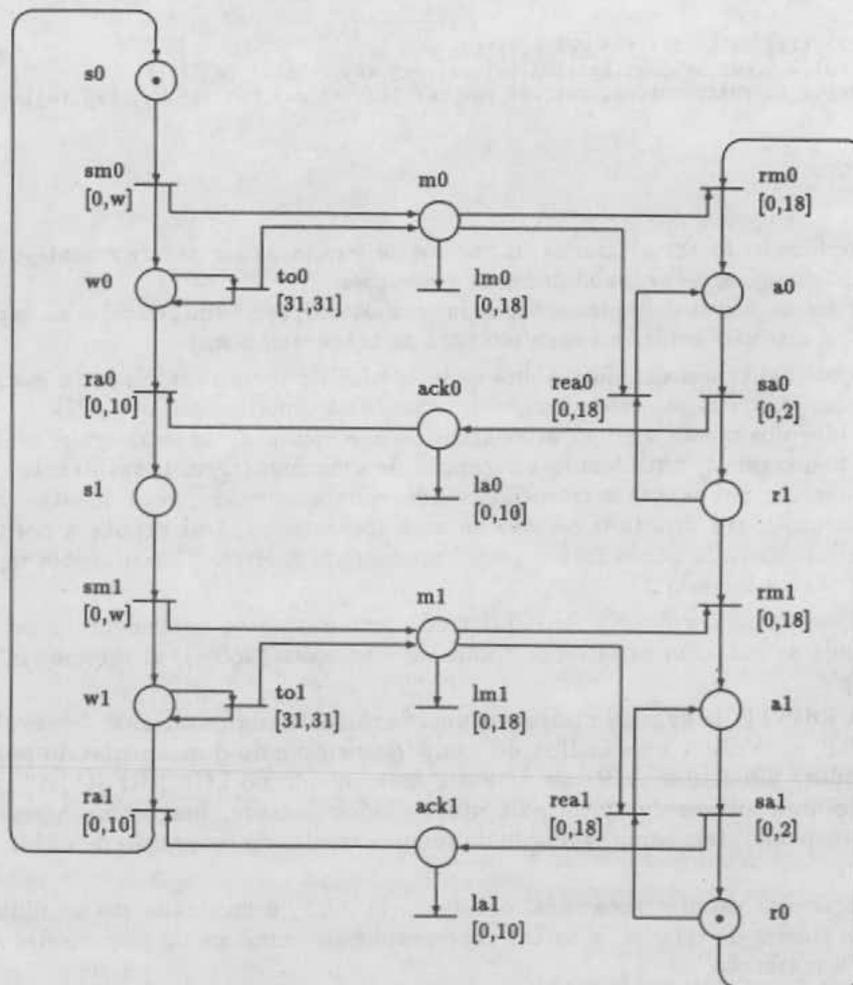


Figure 2 : Uma RdP-TE do protocolo Bit Alternante

Alguns resultados do módulo de avaliação de desempenho do ARP, que trabalha segundo um sistema de simulações repetitivas, para o exemplo da rede do Bit Alternante são dadas em seguida. Os valores referem-se a tempos médios e números médios de disparos de transições relativas a realização de ciclos completos a partir da marcação inicial, isto é, da marcação r_0, s_0 para a marcação r_0, s_0 . Os valores obtidos para os tempos médios de disparo das transições sm_0 (3478.24) e sm_1 (3464.83) diferem muito, em ordem de grandeza, dos outros, devido as distribuições de probabilidades das quais os valores foram tomados: exponenciais negativas para as primeiras; e uniformes para as outras.

```

-----*
Avaliacao de Desempenho Orientada a ESTADOS da rede Bitalt. Marcacao inicial : {r0, s0}
Precisao desejada: 0.10 %                               Max. de disparos : 160
Num. de iteracoes: 1107.                               Iterac. Improdut.: 0 ( 0.00 % )
-----*
Numero medio de disparos das transicoes por ciclo:
(sm0:1.00) (tb0:2.92) (ra0:1.00) (rm0:1.00) (sa0:1.97) (rea0:0.97) (lm0:1.96) (la0:0.97)
(sm1:1.00) (to1:2.81) (ra1:1.00) (rm1:1.00) (sa1:1.97) (rea1:0.97) (lm1:1.84) (la1:0.97)

Tempo medio de disparo:
(sm0:3478.24) (to0: 31.00) (ra0:3.37) (rm0:6.11) (sa0:1.00) (rea0:5.92) (lm0:5.92) (la0:3.32)
(sm1:3464.83) (to1: 31.00) (ra1:3.39) (rm1:5.72) (sa1:0.99) (rea1:6.03) (lm1:5.95) (la1:3.20)

Marcacao media nos lugares:
(r0:0.35) (s0:0.33) (a0:0.00) (a1:0.00) (ack0:0.00) (ack1:0.00) (m0:0.00) (m1:0.00) (r1:0.65)
(s1:0.65) (w0:0.01) (w1:0.01)
-----*
Marcacao destino 1: {r0, s0}      Tempo medio: 7141.55      Desvio: 4750.75
Probab: 100.00 %                  Acessos: 1107          Tempo minimo de acesso: 250.25
Tempo maximo de acesso: 32015.34
-----*

```

Objetivou-se através deste exemplo apresentar a proposta de LOTOS-TE e as potencialidades abertas pela linguagem em termos da transformação em outros modelos e de seu uso para análise de desempenho.

6 Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho foi apresentada uma proposta de um variante do modelo LOTOS Básico, o qual objetiva representar sistemas distribuídos dependentes do tempo e possibilitar a realização de estudos de desempenho a partir de especificações. A linguagem variante de LOTOS foi escolhida devido à sua grande utilização e por ter uma proximidade semântica com o modelo RdP.

As principais características do modelo proposto são:

- **Representação do Tempo:** Em LOTOS-TE o tempo é denso, global, relativo, e representado por intervalos. O tempo denso torna o modelo proposto adequado para representação do tempo-real.
- **Comportamento Temporal:** O modelo de tempo de LOTOS-TE permite representar comportamentos e restrições temporais como *delays*, *timeouts* e *latency*. Além disso, o tempo é estocástico, o que permite representar com fidelidade fenômenos aleatórios associados às ações.
- **Poder de Análise:** Com a definição de LOTOS-TE através do modelo de RdP-TE subjacente pretendeu-se usufruir das técnicas de análise de desempenho e de alcançabilidade em grafos, similares àquelas desenvolvidas para este tipo de RdP.
- **Suporte Automatizado:** O potencial para desenvolvimento de ferramentas automatizadas para análise de especificações LOTOS-TE, construídas a partir de seu relacionamento semântico com o modelo RdP-TE, é um dos aspectos mais atraentes deste modelo.

As limitações mais importantes verificadas no modelo proposto são:

- **Tempo Global:** O modelo de tempo global não é muito adequado para representação conceitual de sistemas distribuídos, visto que, em geral, e de um ponto de vista conceitual não é possível especificar um tempo global para todos subsistemas que o compõem.

- **Escolha Probabilística:** Do ponto de vista da avaliação de desempenho, a falta de um operador de escolha, com probabilidades associadas a cada alternativa (como em [31]), torna bastante complexa a especificação e tratamento deste tipo de comportamento estocástico no modelo proposto.
- **Semântica da Sincronização:** A semântica formal da sincronização, tal como definida na seção 4.5, ainda que correta, não nos parece completamente adequada para representação da sincronização de processos pois impõem severas restrições de tempo para ocorrência da sincronização.

Este trabalho está sendo prosseguido com a realização de estudos para o desenvolvimento de um tradutor do modelo LOTOS-TE para o modelo RdP-TE. A partir disto, espera-se utilizar ferramentas desenvolvidas para RdP-TE, de forma semi-automática.

As principais perspectivas para evolução deste modelo são:

- **Tempo Local:** É possível a introdução de um modelo de tempo local no modelo proposto (por exemplo como é apresentado em [12]), mas o impacto disso ainda não foi avaliado.
- **Escolha Probabilística:** Espera-se introduzir um operador de escolha probabilística de acordo com o modelo descrito em [30].
- **Semântica da Sincronização:** Uma nova regra semântica para representação da sincronização está sendo estudada e deve assumir que ações sincronizam se elas são realizadas dentro de intervalos de tempo especificados e que sejam comuns a todas elas.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr. Guy Juanele, professor da Universidade Paul Sabatier e pesquisador do laboratório LAAS, Toulouse, França, pelas várias discussões sobre este trabalho, e também aos revisores anônimos pelas várias sugestões e correções apresentadas.

Referências

- [1] Baeten, J.C.M. and Bergstra, J.A., *Real Time Process Algebra*, Research Report P8916, University of Amsterdam, Programming Research Group, december, 1989.
- [2] Bochmann, G.v. e Vaucher, J., *Adding Performance Aspects to Specification Languages*, Proc. of Protocol Specification, Testing, and Verification VIII - IFIP, Aggarwal, S e Sabnani, K. (eds), North-Holland, pp. 19-31, 1988.
- [3] Berthomieu, B. ; Diaz, M., *Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets*, IEEE Trans. on Software Eng., Vol. 17, No. 3, marco 1991, pp. 259-273.
- [4] Bochmann, G.v. e Vaucher, J., *Adding Performance Aspects to Specification Languages*, Proc. of Protocol Specification, Testing, and Verification VIII - IFIP, Aggarwal, S e Sabnani, K. (eds), North-Holland, pp. 19-31, 1988.
- [5] Bolognesi, T.; Brinksma, Ed, *Introduction to the ISO Specification Language LOTOS*, Computer Networks and ISDN Systems (NORTH-HOLLAND), Num. 14, 1987, pp. 25-59.
- [6] Bolognesi, T.; Lucidi, F.; Trigila, S., *From Time Petri Nets to Time LOTOS*, Proceedings of IFIP WG 6.1 Tenth International Conference on Protocol Specification, Testing, and Verification, 1990, pp. 377-406.
- [7] Bougé, L., *Sémantique du Parallélisme: un Tour d'Horizon*, Rapport de Recherche du L.I.E.N.S. - Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Normale Supérieure, Julho, 1988
- [8] Brams, G.W., *Réseaux de Petri: Théorie et Pratique*, Ed. Masson, Tomos 1 e 2, Paris, 1983.
- [9] Brinksma, Ed, *On Design of Extended LOTOS: A Specification Language for Open Distributed Systems*, PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1988.
- [10] Camargo, M. S. de, *Réseau de Petri Temporel et Lotos Temporisé: Une Etude de Cas*, Rapport de Recherche No. 90189 du LAAS-CNRS, Toulouse, France, juin, 1990.

- [11] Cardelli, L., *Real Time Agents*, Proc. ICALP'82, Lecture Notes in Computer Science, no. 140, Springer Verlag, 1982.
- [12] Ghezzi, C.; Mandrioli, D.; Morasca, S.; Pezze, M., *A General Way to Put Time in Petri Nets*, ACM SIGSOFT Eng. Notes, Vol. 14, No. 3, may, pp. 60-67, 1989.
- [13] Hansson, H.; Jonsson, B., *A Calculus for Communicating Systems with Time and Probabilities*, Proc. of the Real-Time Systems Symposium, December, 1990, pp. 278-287.
- [14] Hoare, C.A.R., *Communications Sequential Processes*, Prentice-Hall International, 1985
- [15] LOTOS, *A Formal Description Technique Based on the Ordering of Observational Behaviour*, ISO IS 8807, Novembro, 1988.
- [16] Jahanian, F. and Mok, A.K., *Safety Analysis of Timing Properties in Real-Time Systems*, IEEE Trans. on Software Eng., Vol SE-12, N0. 9, pp. 890-904, September, 1986.
- [17] Juanole, G.; Roux, J.-L., *On the Pertinence of the Extended Time Petri Net Model for Analyzing Communication Activities*, in Proc. IEEE International Workshop on Petri Nets and Performance Models, 1989.
- [18] Levi, S.-T.; Agrawala, A.K., *Real-Time System Design*, McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [19] Logrippo, L.; Melanchuck, T.; Du Wors, R.J., *The Algebraic Specification Language LOTOS: An Industrial Experience*, Proc. of the ACM Int. Workshop on Formal Methods in Software Development, ACM Soft. Eng. Notes, Vol. 15, Num. 4, setembro, 1990, pp. 59-66.
- [20] Maziero, C.A., *Um Ambiente para a Análise e Simulação de Sistemas Modelados por Redes de Petri*, Dissertação de Mestrado, LCM/EE/UFSC, 1990.
- [21] Milner, R., *A Calculus of Communicating Systems*, LNCS No. 92, Springer Verlag, 1980.
- [22] Milner, R., *Calculi for Synchrony and Asynchrony*, Theoretical Computer Science, 25, pp. 267-310, 1983.
- [23] Milner, R., *Communication and Concurrency*, Prentice Hall, London, 1989.
- [24] Merlin, P. e Farber, D.J., *Recoverability and Communication Protocols: Implications of a Theoretical Study*, IEEE Trans. Comm., Vol. COM-24, setembro, 1976, pp. 1036-1043.
- [25] Molloy, M.K., *On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Models*, Ph.D. Thesis, University of California at Los Angeles, 1981.
- [26] Nicollin, X.; Richier, J.-L.; Sifakis, J.; Voiron, J., *ATP: An Algebra for Timed Processes*, Research Report RT-C16, IMAG, Université Joseph Fourier, January, 1990.
- [27] Nicollin, X.; Sifakis, J., *An Overview and Synthesis on Timed Process Algebras*, Proceedings of REX Workshop "Real-Time: Theory in Practice", Mook, The Netherlands, Junho, 1991.
- [28] Ostroff, J.S., *Temporal Logic for Real-Time Systems*, Research Studies Press LTD, 1989.
- [29] Quemada, J.; Azcorra, A. and Frutos, D., *A Timed Calculus for LOTOS*, in proceedings of the FORTE 89, Vancouver, Canada, 1989.
- [30] Razouk, R.R. e Phelps, C.V., *Performance Analysis Using Timed Petri Nets*, Proc. of Protocol Specification, Testing, and Verification, Skitop, Pennsylvania, junho, 1984.
- [31] Rico, N.; Bochmann, G.v. *Performance Description and Analysis for Distributed Systems Using a Variant of LOTOS*, Proc. of Protocol Specification, Testing, and Verification X - IFIP, Suécia, Junho 1991.
- [32] Roux, J.-L.; Juanole, G., *Functional and Performance Analysis using Extended Time Petri Nets*, in Proc. IEEE Int. Workshop on Petri Nets and Performance Models, August, 1987.
- [33] Rudin, H., *Time in Formal Protocol Specifications*, IBM - Report Number: RZ 1349, 1985.
- [34] de Saqui-Sannes, P., *Prototypage d'un Environnement de Validation de Protocoles: Application à l'Approche Estelle*, Thèse de Doctorat, LAAS-CNRS, Toulouse, France, 1990.
- [35] Shaw, A.C., *Reasoning About Time in Higher-Level Language*, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 15, No. 7, July, 1989.