

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAGEM E ANÁLISE
DE SISTEMAS ATRAVÉS DE REDE DE PETRI E PROGRAMAS DE
SIMULAÇÃO**

**Bruno Miessa de Barros
Renato Ayres Meloni**

São Paulo

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

nota final
5,8 (cinco e oito)
WBM

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE MODELAGEM E ANÁLISE
DE SISTEMAS ATRAVÉS DE REDE DE PETRI E PROGRAMAS DE
SIMULAÇÃO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Bruno Miessa de Barros
Renato Ayres Meloni

Orientador: Prof. Dr. Paulo E. Miyagi

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo

TE 06
B9785

FICHA CATALOGRÁFICA

Barros, Bruno Miessa de

Sistematização do processo de modelagem e análise de sistemas através de Rede de Petri e programas de simulação / B.M. de Barros, R.A. Meloni -- São Paulo, 2006.

67 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistema a eventos discretos 2.Red de Petri 3.Simulação discreta I.Meloni, Renato Ayres II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011884

153574

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Professor Paulo E. Miyagi pela orientação e paciência durante a realização deste trabalho.

Renato:

Agradeço também à minha família e à Denise Matsumoto pelo apoio e compreensão durante todo este tempo.

Bruno:

Agradeço a minha família, por nunca duvidar e sempre apoiar minhas escolhas, e a meus amigos, pelos grandes momentos vividos juntos.

RESUMO

Este projeto apresenta, de forma sistematizada, um procedimento para modelagem e análise de sistemas artificiais e que são classificados como sistemas a eventos discretos, isto é, sistemas nos quais os estados e os eventos não são funções contínuas e nem discretizáveis no tempo e que envolvem procedimentos definidos pelo homem. O estudo considera técnicas derivadas de redes de Petri e ferramentas como programas de simulação discreta. Com este intuito, analisa-se um estudo de caso na área de saúde (laboratório clínico de um hospital) no qual há forte interação com o homem. O procedimento envolve a construção de modelos através de uma abordagem inicialmente conceitual, que é refinada gradualmente para um modelo funcional do sistema, onde se realiza uma análise qualitativa. Os mesmos modelos são então interpretados para a entrada de dados em programas de simulação disponíveis no mercado como o ProModel e que dispõem de recursos que auxiliam a análise qualitativa do sistema.

Palavras chave: sistema a eventos discretos, rede de Petri, simulação discreta.

ABSTRACT

This project presents, in a systematized way, a procedure for modeling and analyzing artificial systems witch are classified as discrete event systems. These are systems in witch the states and events are not continuous functions and usually have human interaction. The study considers techniques of Petri Nets and tools like discrete simulation software's.

With this intention, it is analyzed a case study in the healthcare field (the laboratory of a hospital) in witch there is a strong human interaction. The procedure includes the construction of models using a conceptual initial approach, witch is gradually refined to generate functional models of the system that can be used for quantitative analysis. These are transformed to have their data entered in commercial simulation programs available like ProModel that has resources to help in the qualitative analysis of the system.

Key Words: Petri Net, discrete event systems, discrete simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. Introdução.....	1
1.1. <i>Motivação</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	2
1.3. <i>Organização do texto</i>	2
2. Principais Conceitos, Técnicas e Ferramentas Consideradas	4
2.1. <i>Simulação de sistemas</i>	4
2.1.1. Planejamento do estudo.....	5
2.1.2. Definição do Sistema.....	9
2.1.3. Construção do modelo.....	9
2.1.4. Experimentação.....	10
2.1.5. Análise dos dados gerados	11
2.1.6. Informação de resultados.....	11
2.2. <i>Sistemas a eventos discretos</i>	12
2.2.1. Modelos de SED's	14
2.3. <i>Rede de Petri</i>	16
2.3.1. Production Flow Schema (PFS).....	18
2.3.2. Mark Flow Graph (MFG).....	20
2.3.3. Dinâmica da RdP	21
2.3.4. Simulador de RdP	22
2.4. <i>"Pacotes" de simulação</i>	23
2.4.1. ProModel.....	24
2.4.2. SIMUL8.....	26
2.5. <i>Síntese do capítulo</i>	27
3. Estudo de caso	28
3.2. <i>Descrição do Processo</i>	29
3.3. <i>Dados estimados</i>	31
3.4. <i>Modelo do SIMUL8</i>	32
4. Modelagem e Análise Qualitativa	35
4.1. <i>Modelo Conceitual em PFS</i>	35
4.2. <i>Modelagem funcional em MFG</i>	35
4.2.1. Análise qualitativa	43
5. Análise Quantitativa.....	49
5.1. <i>Validação dos modelos</i>	50
5.1.1. Fila da colocação do código de barras.....	50
5.1.2. Fila do banco de dados	51
5.1.3. Fila dos testes de rotina	52
5.1.4. Fila da validação dos testes de rotina	53
6. Comentários Finais e Conclusões.....	54
7. Referências Bibliográficas	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Natureza interativa de projetos de simulação.....	4
Figura 2.2 - Confinando o escopo para áreas de impacto.	7
Figura 2.3 - Efeito do nível de detalhe no tempo de desenvolvimento de um modelo.	8
Figura 2.4 - Exemplo da Trajetória de um SED	13
Figura 2.5 - Exemplo de trajetória de um SVC.....	14
Figura 2.6 - Exemplo de rede de Petri	17
Figura 2.7 - Exemplo de PFS com a identificação de seus elementos estruturais.....	19
Figura 2.8 - Exemplo de MFG com a identificação de seus elementos estruturais.....	21
Figura 2.9 - Disparo da “transição” de uma RdP.....	22
Figura 2.10 - Tela do software ProModel.	26
Figura 2.11 - Tela do software SIMUL8.....	27
Figura 4.1 - PFS	35
Figura 4.2 – Grafo em MFG da chegada de amostras externas.....	36
Figura 4.3 – Grafo em MFG da chegada de amostras internas.....	37
Figura 4.4 – Grafo em MFG do recebimento de amostras.....	38
Figura 4.5 – Grafo em MFG da colocação do código de barras.....	38
Figura 4.6 – Distribuição de probabilidade do número de testes nos exames de rotina a serem realizados.	39
Figura 4.7 – Grafo em MFG do controle dos exames.	40
Figura 4.8 – Grafo em MFG da centrifugação de amostras.....	41
Figura 4.9 – Grafo em MFG dos exames de rotina.	42
Figura 4.10 – Grafo em MFG da validação de exames de rotina.....	42
Figura 4.11 – Grafo em MFG dos exames especiais.....	43
Figura 4.12 – Grafo em MFG da validação de exames especiais.....	43
Figura 4.13 - Detalhe da escala temporal em RdP.....	44
Figura 4.14 - Chegada de amostras externas.....	45
Figura 4.15 - Chegada de amostras internas.	45
Figura 4.16 - Recebimento de amostras.	46
Figura 4.17 - Detalhe das restrições lógicas e físicas das centrífugas.....	47
Figura 4.18 - Detalhe do esquema lógico e físico dos analisadores.	48
Figura 5.1 - Modelo do ProModel.	49
Figura 5.2 - Fila de colocação do código de barras. Modelo do ProModel.	50
Figura 5.3 – Fila do banco de dados. Modelo do ProModel.....	51
Figura 5.4 – Fila do teste de rotina. Modelo do ProModel.	52
Figura 5.5 – Fila de validação do teste de rotina. Modelo do ProModel.	53
Figura 6.1 - Procedimento adotado no projeto.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Teorias de modelagem de SED's	16
Tabela 3.1 - Limites de funcionários em cada setor.	31
Tabela 4.1 – Agenda de chegadas de amostras externas	36
Tabela 4.2 - Distribuição de chegadas de amostras internas.....	37
Tabela 4.3a – Proporção de cada tipo de exame.....	39
Tabela 4.3b – Testes realizados em cada exame.....	39

1. Introdução

1.1. Motivação

A simulação em engenharia pode ser compreendida como a representação ou reprodução do funcionamento de um processo, fenômeno ou sistema, por meio de um modelo dos respectivos comportamentos dinâmicos, geralmente para fins de observação, análise e predição. É utilizada também como forma de treinamento de operadores de equipamento. Outra definição que pode ser dada é de experiência ou ensaio realizado com o auxílio de modelos, relativos a processos concretos que não podem passar por experimentação direta. Simular, portanto, é fazer parecer real uma abstração, ou seja, reproduzir, da forma mais aproximada da realidade, certos aspectos de uma situação ou processo (BATEMAN, 1997).

Entende-se como simulação computacional o conjunto formado pelo processo de construção de um modelo e a execução de experimentos através de uma ferramenta computacional. Estes experimentos permitem a realização de inferências sobre o sistema com as vantagens de não alterá-lo, não construí-lo ou não destruí-lo de fato. Assim pode-se definir a simulação computacional de sistemas como sendo “a técnica de resolução de problemas através da execução, no tempo, de um modelo dinâmico do sistema” (GORDON, 1978). Neste sentido constrói-se um modelo computacional e testam-se alternativas a respeito do funcionamento do sistema. Em outras palavras, cria-se um procedimento de teste de situações. Testa-se uma alternativa, se analisa os resultados da simulação e então se procura avaliar questões do tipo “what if”, objetivando melhorar o desempenho do sistema.

A exemplo de muitas técnicas e metodologias de análise de sistemas, a simulação surgiu nas décadas de 50 e 60, em aplicações militares. Na época, levavam-se meses para construir modelos, pois era necessário programar máquinas que executavam modelos em linguagens pouco flexíveis. Assim como os computadores tornaram-se cada vez mais acessíveis, a simulação também se desenvolveu, adotando novos conceitos, nos quais a modelagem é facilitada através de conceitos e recursos mais avançados e apropriados e de “pacotes” de simulação, que oferecem diversas facilidades, tanto para a edição de

modelos quanto para a visualização dos cenários e para a análise de dados.

Em relação aos conceitos envolvidos na modelagem de sistemas destaca-se o trabalho de Carl Adam Petri, que em sua tese de doutorado, introduziu a rede de Petri, que envolve uma técnica gráfica e matemática de modelagem que pode ser aplicada nos chamados sistemas a eventos discretos.

Assim, tem se observado, de um lado, o contínuo estudo e aprimoramento das propriedades das redes de Petri e suas extensões visando a caracterização e análise de sistemas. E, de outro lado o desenvolvimento de novas versões de “pacotes” de simulação.

Nota-se assim que apesar de ser evidente que o uso integrado desses aspectos (conceito, teoria, ferramenta) ser fundamental em aplicações práticas de análise de sistemas, poucos trabalhos explicam de forma sistematizada como se deve explorar as redes de Petri junto com os “pacotes” de simulação hoje disponíveis no mercado.

1.2. Objetivos

De acordo com o que foi exposto, o objetivo deste trabalho é, através de um estudo de caso prático, apresentar de forma sistematizada um procedimento para a modelagem e análise de sistemas baseado em redes de Petri e “pacotes” de simulação.

1.3. Organização do texto

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica dos temas relevantes ao trabalho. É feita uma recapitulação das propriedades de sistemas a eventos discretos, e apresenta-se os conceitos básicos de redes de Petri e suas extensões como o PFS e MFG. A seguir é abordado o tema de “pacotes” de simulação.

No Capítulo 3 é apresentada a descrição do estudo de caso utilizado no trabalho.

Neste Capítulo 4 são apresentados os modelos do sistema desenvolvidos segundo um procedimento sistematizado. É mostrado o modelo conceitual do sistema em PFS e o detalhamento dos processos, para a derivar o modelo funcional em rede de Petri, que depois é analisado através de ferramentas existentes. É então apresentado o modelo que é introduzido num “pacote” de simulação visando o estudo de diferentes cenários e

comportamentos do sistema.

O objetivo do capítulo 5 é sintetizar as principais contribuições e limitações de trabalho realizado.

2. Principais Conceitos, Técnicas e Ferramentas Consideradas

2.1. Simulação de sistemas

Um estudo de simulação é, por sua natureza, um projeto. Desta forma, existem etapas a serem cumpridas e recursos que são necessários para cumpri-las (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000, SHANNON, 1975 e GORDON, 1978).

Em um projeto de simulação, decisões sobre a condução do estudo devem ser tomadas. Não há regras precisas sobre como conduzir um estudo de simulação. No entanto, os passos seguintes são geralmente recomendados como linha guia (SHANNON, 1975 e GORDON, 1978):

1. planejar o estudo;
2. definir o sistema;
3. construir o modelo;
4. executar experimentos;
5. analisar os dados gerados;
6. fazer relatório dos resultados.

O processo de simulação é interativo e cada atividade é definida e algumas vezes redefinida com a interação dos passos (Figura 2.1):

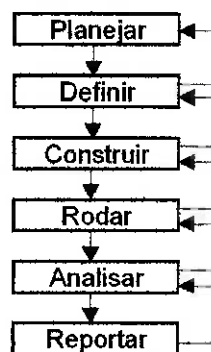


Figura 2.1 - Natureza interativa de projetos de simulação (ProModel, 2002).

2.1.1. Planejamento do estudo

O planejamento de um estudo de simulação envolve as seguintes sub-tarefas:

- definir objetivos;
- identificar as restrições;
- preparar as especificações da simulação.

a) Definição dos objetivos

Após um entendimento básico do sistema e verificação de seus pontos de interesse, um ou mais objetivos devem ser definidos para o estudo. A simulação só deve ser feita se um objetivo pode ser claramente determinado e se a simulação se mostrar a ferramenta ideal para atingir este objetivo. Definir um objetivo não significa necessariamente que há um problema conhecido para ser resolvido; um objetivo perfeitamente válido pode ser identificado se há no sistema um problema que ainda não foi visualizado.

Para compreender os objetivos de uma simulação, deve-se considerar tanto o propósito quanto a intenção de seu uso. As respostas para as questões a seguir podem ajudar neste processo:

- Por que se está usando simulação?
- Quem usará o modelo?
- Para quem os resultados da simulação serão apresentados?
- Quais as informações que são esperadas do modelo?
- Este é um modelo descartável?
- Qual é a importância da decisão a ser tomada?

b) Identificação das restrições

Tão importante quanto definir os objetivos é determinar as restrições sob as quais o estudo deve ser conduzido. Não se pode permitir que a simulação necessite de um tempo de estudo que ultrapasse o limite para a aplicação de uma solução, ou que o custo

de se achar a solução exceda o benefício conseguido. Os objetivos devem ser limitados pelas restrições do projeto tais como orçamento, prazos, disponibilidade de recursos, etc.

Na identificação das restrições, tudo que tiver um efeito limitante em relação ao cumprimento dos objetivos deve ser considerado. Deve-se ter, assim, respostas para as seguintes questões:

- Qual é o orçamento para o estudo?
- Qual é o prazo para se realizar o estudo?
- Os dados de entrada são acessíveis? Em que grau?
- Qual é o equipamento que será utilizado?

c) Preparação da especificação da simulação

Com os objetivos claramente definidos e conhecidas as restrições, as exigências da simulação podem ser determinadas. Definir as especificações da simulação é fundamental para se projetar o tempo e custo que serão necessários para completar o estudo. As especificações também ajudam a guiar o estudo e a deixar bem claro, para todos os envolvidos, o que a simulação incluirá ou excluirá. Os aspectos do projeto de simulação que devem estar na especificação incluem os seguintes pontos:

- **Escopo:** o escopo se refere aos limites do sistema ou a quanto o sistema irá englobar. Para se determinar o escopo do projeto, deve-se ater à relação ou impacto que uma atividade em particular tem, no sentido de atingir os objetivos da simulação. Na Figura 2.2, ilustra-se que o escopo do modelo deve ser confinado àquelas atividades, cujas interações têm efeito direto no processo estudado. As atividades anteriores e posteriores, que não causam impacto direto no sistema, devem ser ignoradas.

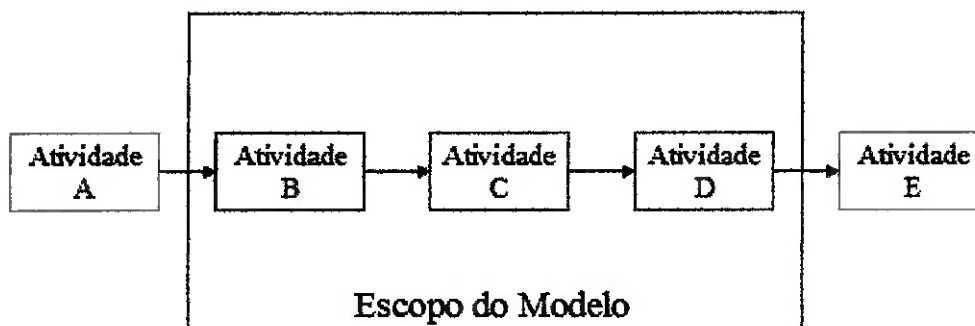


Figura 2.2 - Confinando o escopo para áreas de impacto (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000).

- **Nível de detalhes:** o nível de detalhes define a profundidade ou resolução do modelo. Em um extremo, um sistema inteiro pode ser modelado como uma “caixa preta”, com um tempo de atividade aleatório. Em um outro extremo, cada ação detalhada de um componente do sistema pode ser modelado com uma correspondência “um a um”, retratando toda a sua operação. Diferentemente do escopo, que afeta somente a abrangência do modelo, o nível de detalhe afeta a complexidade tanto quanto sua abrangência. Determinar o nível apropriado de detalhes é uma decisão importante. Muitos detalhes tornam difícil e demorada a construção de um modelo válido; por outro lado, poucos detalhes podem tornar o modelo inadequado pela exclusão de variáveis críticas. A Figura 2.3 ilustra como o tempo de desenvolvimento do modelo é afetado pelo nível de detalhes. Também evidencia a importância de se incluir somente os detalhes suficientes para atingir os objetivos do estudo.

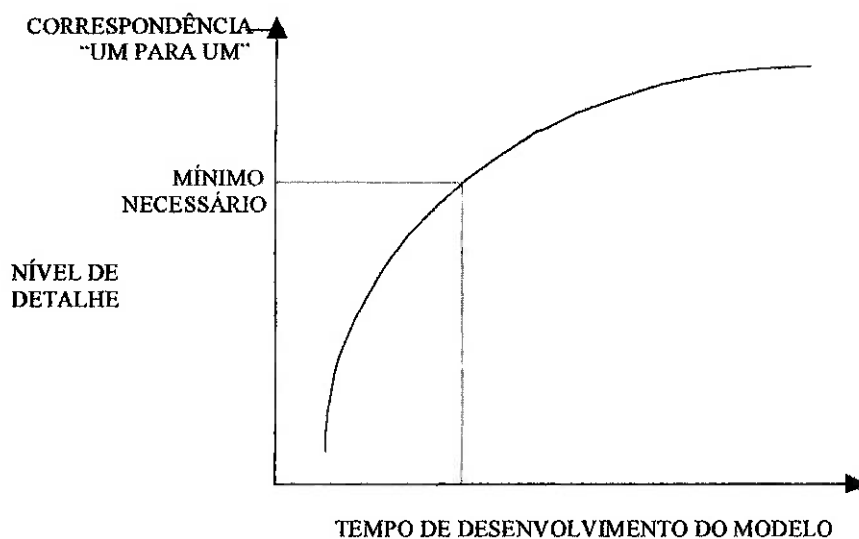


Figura 2.3 - Efeito do nível de detalhe no tempo de desenvolvimento de um modelo (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000).

- **Precisão:** o grau de precisão diz respeito à correção dos dados usados. Para alguns modelos ou certas atividades, a informação não precisa ser acurada ou exata; em contrapartida, a informação precisa ser exata para outras. O grau necessário de precisão é determinado pelos objetivos do estudo. A acurácia pode algumas vezes ser sacrificada se as informações não estão disponíveis como, por exemplo, quando se modela um sistema ainda inexistente.

- **Tipos de experimentos:** a quantidade ou natureza das alternativas de soluções a serem testadas deve ser planejada desde o início, de forma a assegurar que o tempo adequado está sendo alocado ao projeto. Frequentemente, esta decisão é influenciada pelo limite de prazo imposto. Quando as alternativas a serem calculadas diferem muito pouco, um “modelo base” pode ser construído de forma a requerer somente pequenas modificações para modelar cada alternativa. Se as configurações das alternativas são significativamente diferentes, pode-se ter que fazer o mesmo esforço para realizar os vários modelos quanto para desenvolver um modelo básico inicial.

- **Forma dos resultados:** a forma como os resultados serão apresentados pode afetar significativamente o tempo e o esforço envolvidos no estudo de simulação. Se uma animação detalhada ou relatórios extensivos são esperados, o projeto pode se estender por muito tempo antes da fase experimental poder ser completada. Muitas vezes, o único

resultado requerido é a verificação se o sistema é capaz de atingir um determinado patamar de produção. Nestes casos, a resposta esperada pode estar na forma de relatórios mais simples contendo o total produzido em determinado período ou a produtividade média.

2.1.2. Definição do Sistema

No planejamento do estudo realizado, deve-se desenvolver um modelo conceitual sobre o qual o modelo de simulação será baseado. O processo de reunião dos dados do sistema pode ser dominado por um conjunto de dados sem correlação, que deve ser investigado. Os dados raramente estão na forma exata, que melhor pode representar o funcionamento do sistema.

A reunião de dados nunca deve ser feita sem um propósito. Ao invés de se procurar aleatoriamente, a busca deve ser orientada ao objetivo, com foco sobre dados e informações que ajudam a atingir as metas do estudo.

Para ajudar o processo de levantamento de dados para a definição do sistema, os passos seguintes são recomendados:

- determinar as necessidades em termos de dados;
- usar as fontes apropriadas;
- fazer suposições quando necessário;
- converter os dados para um formato útil;
- documentar e aprovar (validar) os dados.

2.1.3. Construção do modelo

Compiladas as informações necessárias para a operação básica do sistema, a atividade de construção do modelo pode ser iniciada. Enquanto iniciar a construção do modelo muito cedo pode envolver o desperdício de esforços, esperar até que todas as informações sejam completamente levantadas pode provocar um atraso desnecessário. Iniciar a construção do modelo antes que todas as informações sejam colhidas ajuda a identificar informações necessárias ainda não vistas.

Uma característica da simulação é que os modelos não precisam conter todos os

detalhes finais antes de serem executados. Isto envolve um refinamento progressivo no qual detalhes são incluídos gradativamente, ao invés de todos ao mesmo tempo. O método de refinamento progressivo, além de facilitar a construção do modelo, torna mais fácil a correção de defeitos.

Durante todo o processo de construção do modelo, deve-se estar constantemente atento à fidelidade com que o modelo reflete as características do sistema. Este processo é denominado validação. Ter um modelo válido significa que, por todos os aspectos externos, o mesmo deve ser uma acurada representação do sistema real. Deste ponto de vista, validar um modelo é o processo de confirmar que o modelo, em seu domínio de aplicabilidade, é suficientemente acurado para a aplicação pretendida.

Não há nenhum teste simples para estabelecer a validade do modelo. A validação é um processo indutivo no qual extraem-se conclusões sobre a acurácia do modelo baseada nas evidências disponíveis. O levantamento das evidências para determinar a validade do modelo é freqüentemente iniciado pelo exame da estrutura do modelo (por exemplo, os algoritmos e os relacionamentos) para confirmar se ela corresponde à estrutura funcional do sistema real. Para modelos com lógicas complexas de controle, a animação gráfica é uma “boa” ferramenta para a validação. Finalmente, os dados obtidos também devem ser analisados para ver se os resultados são coerentes. Se as circunstâncias permitirem, o modelo pode ser comparado com o sistema real e onde se verifica a correspondência dos dados obtidos. Se estes procedimentos são executados sem que se encontre uma discrepância entre o sistema real e o modelo, é dito que o modelo está validado.

2.1.4. Experimentação

O quarto passo em um estudo de simulação é conduzir experimentos com o modelo. Em um experimento de simulação, existem variáveis de entrada independentes que podem ser manipuladas. Os efeitos destas manipulações sobre as variáveis dependentes ou de resposta são medidos e correlacionados.

Durante a experimentação, se estimula a criatividade e as sugestões baseadas em conhecimento e experiências pessoais. Não existem restrições orçamentárias ou de viabilidade sobre os experimentos a serem conduzidos, desde que estes estejam previstos

no escopo do projeto. Pode-se, por exemplo, introduzir no modelo um grande número de empregados ou considerar uma gama de máquinas mais rápidas e eficientes sem se preocupar com reações dentro da instituição.

2.1.5. *Análise dos dados gerados*

A análise dos dados gerados lida com a extração de conclusões sobre o sistema através das respostas da simulação. O mais valioso benefício da simulação é, em geral, a obtenção de um resultado qualitativo, uma tendência e não necessariamente respostas absolutas. Com isto em mente, deve-se evitar o imediatismo em relação às saídas da simulação. CONWAY, MAXWELL e WORONA apud ProModel User's Guide (2002), enfatizam uma leitura prática e intuitiva dos resultados da simulação.

A meta de análise dos experimentos, em geral, não é saber se um sistema se comporta bem, mas adquirir conhecimento suficiente para melhorá-lo. Infelizmente, as saídas do sistema raramente identificam a causa do problema. Na maioria das vezes, elas reportam apenas o comportamento sintomático dos mesmos. Atividades “gargalo”, por exemplo, são normalmente identificadas pela observação de filas que estão quase sempre cheias. Detectar a fonte do “gargalo” é um pouco mais trabalhoso do que identificar o próprio “gargalo”. Os “gargalos” podem ser causados por tempos excessivos de operações, esperas prolongadas devido à indisponibilidade de recursos ou uma quantidade expressiva de interrupção das atividades. A habilidade de extrair conclusões corretas dos resultados da simulação é essencial para fazer melhorias no sistema.

2.1.6. *Informação de resultados*

O último passo de um projeto de simulação envolve a elaboração de recomendações para as melhorias no sistema atual, baseadas nos resultados do modelo. Estas recomendações devem ser apresentadas e embasadas de forma a permitir que se tomem decisões. Afinal, a simulação é uma ferramenta de apoio à tomada de decisões.

2.2. Sistemas a eventos discretos

Os sistemas a eventos discretos (SED's), são sistemas concebidos e construídos pelo homem (*man made systems*) e cuja dinâmica é dirigida pela ocorrência de eventos discretos a intervalos em geral irregulares e desconhecidos (RAMADGE; WONHAM, 1989). Estes sistemas podem ser assíncronos e sequenciais, com características como concorrência, conflito e indeterminação na execução dos seus processos. Alguns exemplos desses sistemas são: sistemas de manufatura, redes de computadores, sistemas de tráfego, etc. (CASSANDRAS, 1990).

Nos SED's a ocorrência de um evento (por exemplo: a "chegada" de um usuário na porta de um edifício, "início" ou "término" de uma tarefa etc.), causa a mudança na configuração interna ou estados do sistema, a qual será mantida até a ocorrência de um novo evento. Estes eventos são por natureza instantâneos (tempo de duração desprezível em relação à duração dos estados) o que lhes confere caráter discreto. Em contraposição existem os chamados sistemas a variáveis contínuas (SVC's) dirigidos pelo tempo, e cuja dinâmica é descrita por variações contínuas dos eventos e estados.

O estudo dos SED's é relativamente recente em relação ao conhecimento alcançado nos SVC's; principalmente se comparado com o paradigma das equações integro-diferenciais usado para o tratamento dos SVC's, nota-se que a modelagem matemática dos SED's ainda está longe de uma consolidação (HO, 1991).

Devido as suas características, os SED's não podem ser facilmente descritos utilizando a teoria tradicional de controle realimentado que trata os SVC's ou sistemas de variáveis discretizadas no tempo, através das equações diferenciais ou equações de diferenças (HO, 1991). A trajetória (evolução de estados) típica de um SED é apresentada na Figura 2.4.

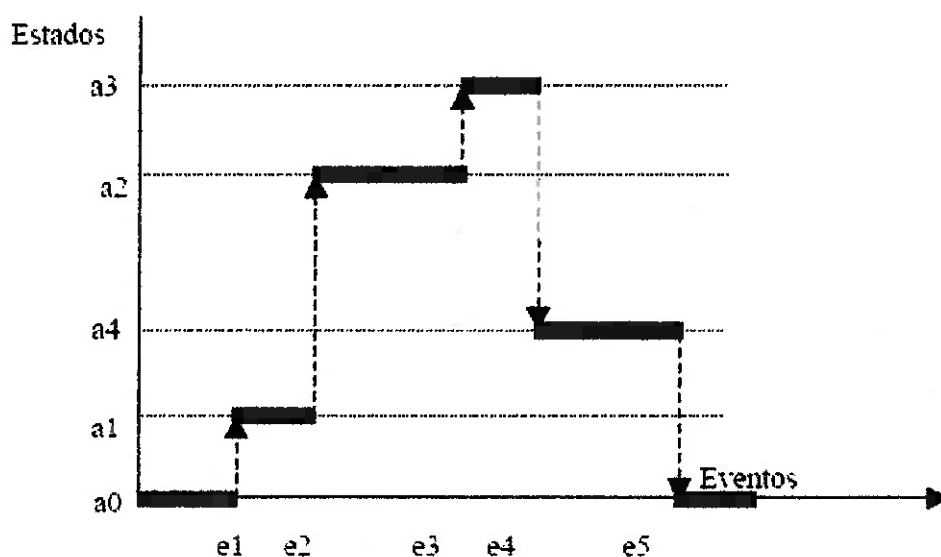


Figura 2.4 - Exemplo da Trajetória de um SED

A Figura 2.4 apresenta como exemplo a dinâmica de um sistema de acesso a um edifício onde a0 representa o estado inicial, isto é, o estado no qual as portas de entrada do edifício se encontram antes da ocorrência do primeiro evento. Ao ocorrer o primeiro evento e1 (ordem para abrir as portas) o sistema muda para o estado a1 (porta externa abrindo). Depois de acontecer o evento e2 (porta externa aberta) o sistema ficará no estado a2 (porta interna abrindo) até que o evento e3 (porta interna aberta) ocorra o qual fará que o sistema mude para o estado a3 (portas abertas). Após a ocorrência de e4 (ordem para fechar as portas) o sistema está no estado a4 (portas interna e externa fechando); mudando para o estado de repouso com a ocorrência de e5 (portas fechadas).

Em contraste, a Figura 2.5 apresenta a trajetória de um SVC, por exemplo, o sistema de acionamento de um atuador para abertura de uma porta a qual é descrita por uma equação diferencial.

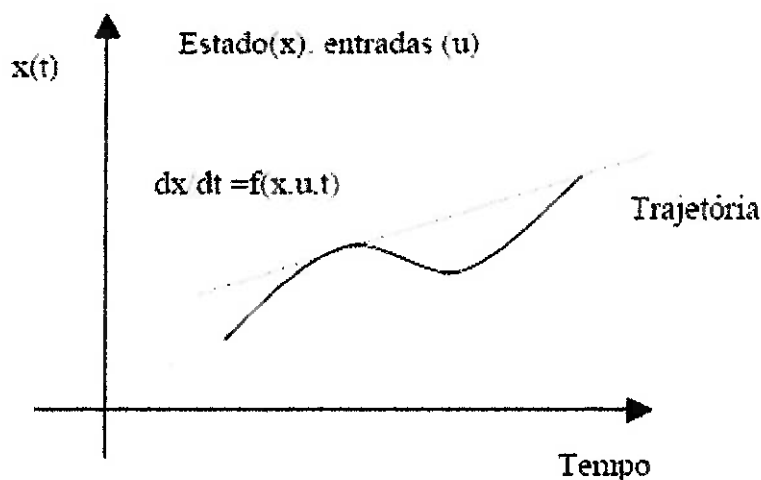


Figura 2.5 - Exemplo de trajetória de um SVC

A comparação da trajetória de estados de um SED com um SVC evidencia suas diferenças e ressalta o fato que o espaço de estados de um SED é limitado a um conjunto enumerável, enquanto que o espaço de estados de um SVC é contínuo e infinito. Estes SVC's em geral, mudam de estado a cada instante e seu comportamento é descrito por uma função que relaciona o estado (variável dependente) ao tempo (variável independente). Os SED's por sua vez, podem permanecer por um tempo arbitrário em um mesmo estado, sendo que sua trajetória pode ser caracterizada somente por uma sequência de eventos.

Em geral, pode-se dizer que a teoria dos SED's trata com o controle das atividades que um sistema pode realizar, sem preocupar-se diretamente com as leis físicas envolvidas. Por sua vez a teoria dos SVC's se relaciona diretamente com as leis físicas envolvidas dessas atividades.

2.2.1. Modelos de SED's

Considerando que os principais objetos práticos de estudo dos SED's são sistemas caracterizados por altos custos e grande complexidade devido à grande quantidade e necessidade de integração de seus componentes (hardware, software e seres humanos), é fundamental o emprego de metodologias de projeto e controle que assegurem o

comportamento do sistema de acordo com as especificações lógicas e restrições físico-operacionais.

Várias técnicas têm sido propostas e desenvolvidas para a modelagem de SED's baseadas nas propriedades que estes sistemas apresentam (reinicialização, sincronização, concorrência e etc.), mas ainda nenhuma delas mostrou generalização suficiente para ser amplamente adotada em qualquer tipo de sistema (aplicações práticas). Entre elas estão (HO, 1989; CAO, 1989; ZHOU, DICESARE, 1993):

- Cadeias de Markov / Autômatos;
- Máquinas de estados finitos;
- Teoria das Filas;
- Processos semi-Markovianos Generalizados (GSMP), incluídos aqui as linguagens de simulação discreta;
- Modelos auxiliados por computador, como processos recursivamente finitos ou processos seqüenciais de comunicação;
- Redes de Petri (RdP).

Segundo HO (1989), estas teorias para a modelagem de SED's podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios como, por exemplo, o ilustrado na Tabela 2.1. Nesta tabela, classificam-se em:

- Modelos temporizados e não temporizados conforme considerem ou não os instantes de tempo em que ocorrem os eventos;
- Modelos lógicos, algébricos e de análise de desempenho: segundo sejam orientados ao uso de asserções lógicas, operações algébricas ou formulação probabilística respectivamente.

Tabela 2.1 – Teorias de modelagem de SED's

	Temporizados	Não Temporizados
Lógicos	Lógica Temporal: autômatos temporizados Redes de Petri	Redes de Petri Máquinas de estado finito
Algébricos	Álgebra Min-Max	Processos recursivamente finitos Processos sequenciais
Análise de Desempenho	Cadeias de Markov Teoria das Filas GSMP/Simulação	Estocásticos

2.3. Rede de Petri

Em 1962, em sua tese de doutorado, Carl Adam Petri introduziu o conceito de rede de Petri (RdP). Com o passar dos anos, este foi difundido internacionalmente através de conferências e publicações acadêmicas.

A RdP envolve uma descrição gráfica e matemática para modelagem que pode ser aplicada em diversos tipos de sistemas. Ela permite a modelagem de paralelismo, concorrência, assincronismo e não determinismo de processos. É um modelo do tipo condição-evento, no qual cada evento possui pré-condições que vão permitir sua ocorrência e pós-condições decorrentes desta. As pós-condições de um evento são, por sua vez, pré-condições de outros eventos posteriores. Outra importante característica é a possibilidade da análise da estrutura e do comportamento dinâmico do sistema modelado.

O formalismo matemático da RdP possibilita a análise das propriedades do modelo de modo que verificações de características inerentes aos sistemas concorrentes, tais como relações de precedência entre eventos, sincronização e existência ou inexistência de bloqueio podem ser feitas formalmente. Permite também a visualização dos processos, o que facilita a comunicação entre projetistas e analistas dos sistemas.

A RdP é formada por dois tipos de componentes: um ativo denominado de “transição” e outro passivo denominado “lugar”. Os “lugares” correspondem às variáveis de estado e as “transições” às ações (eventos) realizadas pelo sistema. Os “arcos” que interligam “lugares” às “transições” correspondem à relação entre as pré e pós-condições

dos eventos. Uma RdP pode ser vista como um grafo orientado mais uma “marcação”, definida por:

- “Lugar” (representado por um círculo) que modela a condição de um agente (entidade ou recurso) e corresponde às condições que devem ser satisfeitas para os eventos acontecerem;
- “Transição” (representada como um retângulo ou barra) que modela um evento, tal como o início de uma operação, que corresponde às mudanças de estado do sistema;
- “Arco Orientado” que interliga um “lugar” a uma “transição” ou vice-versa, encadeando condições e eventos.
- “Marca” ou “Ficha” que representa a condição “satisfeita” de um “lugar” e, o posicionamento dessas fichas em alguns “lugares” do grafo, constitui a “marcação” da RdP. A evolução da “marcação” permite modelar o comportamento dinâmico do sistema.

A Figura 2.6 ilustra esses elementos em um exemplo de RdP:

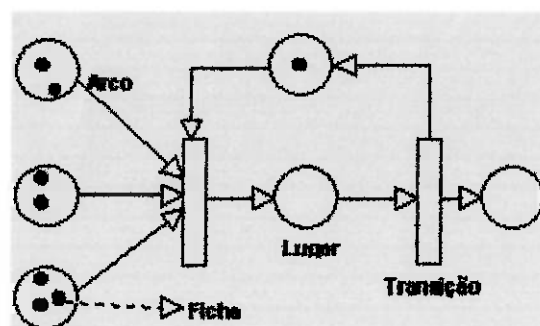


Figura 2.6 - Exemplo de rede de Petri

A RdP é, portanto, um formalismo que permite a modelagem de sistemas dinâmicos com grande poder de expressividade, possibilitando a representação com facilidade de todas as relações de causalidade entre processos. O interesse pela RdP tem aumentado, nos últimos anos, devido às possibilidades representadas pelas redes de alto nível, que permitem modelar sistemas com um nível de complexidade maior, isto é, RdP com funções e recursos adicionais que permitem a geração de modelos mais compactos; e

pelas extensões que incorporam parâmetros temporais.

A RdP é uma técnica extremamente eficiente para a modelagem de SED's e permitem o desenvolvimento de poderosas ferramentas de análise e síntese das estratégias de controle. Entretanto na modelagem de sistemas complexos e com diferentes níveis de abstração é necessário considerar alguma forma de sistematização das partes para a sua visualização gráfica. Desta forma verifica-se que é adequado que a modelagem inicial seja realizada utilizando-se interpretações não formais e a partir destes modelos seja conduzido um detalhamento gradativo e com interpretações formais. E é nesse contexto que as técnicas do PFS (*Production Flow Schema*) e do MFG (*Mark Flow Graph*) são consideradas (HASEGAWA et al., 1988, BASTIDAS, 1999).

O PFS e o MFG são extensões interpretadas da RdP (de modo que herdam o poder de representação e as técnicas formais de análise), próprias para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SED's.

2.3.1. *Production Flow Schema (PFS)*

O PFS é a técnica desenvolvida para sistematizar e facilitar a modelagem por RdP. No desenvolvimento de estratégias de controle de SED's os eventos identificam um certo tipo de atividade que pode incluir vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente, isto é, esses eventos devem ser tratados como macro eventos. Com base nessa idéia, diversos tipos de recursos e mecanismos de controle de fluxos são adicionados, para que o conteúdo de um modelo PFS, cujo foco está na estrutura do sistema, seja convertido em um MFG, cujo foco está na descrição da dinâmica do sistema.

Um SED pode ser caracterizado com base no fluxo de itens, e desta forma qualquer processo produtivo pode ser decomposto em três elementos básicos:

- Elementos (ativos) correspondentes a atividades, chamados aqui de “atividades”;
- Elementos (passivos) correspondentes a distribuições, chamados aqui de “distribuidores”;
- Arcos, que representam as relações entre os elementos anteriores.

Uma “atividade” corresponde a um macro-evento que representa a realização de certas unidades (ou conjuntos) de operações como processamento, montagem, desmontagem, etc.

Os arcos indicam a orientação do fluxo de itens. Arcos conectados na parte externa da “atividade” (representadas entre “[” e “]”) indicam o fluxo principal de itens, e os arcos conectados na parte interna da “atividade” indicam o fluxo secundário de itens.

Um “distribuidor” corresponde a um local onde itens entram e saem. Entre a entrada e a saída, os itens ficam temporariamente alojados. Assim, “distribuidores” possuem uma característica muito semelhante a um local ou depósito com capacidade limitada.

O diagrama resultante da representação do fluxo de itens em um processo produtivo, composto pelos elementos acima descritos, é o PFS. Note que neste caso não existe o conceito de “marcas”, “marcações” e sua dinâmica.

As interpretações, isto é, as inscrições no PFS são simples descrições das “atividades” e “distribuições”. Um exemplo de PFS pode ser visto na Figura 2.7.

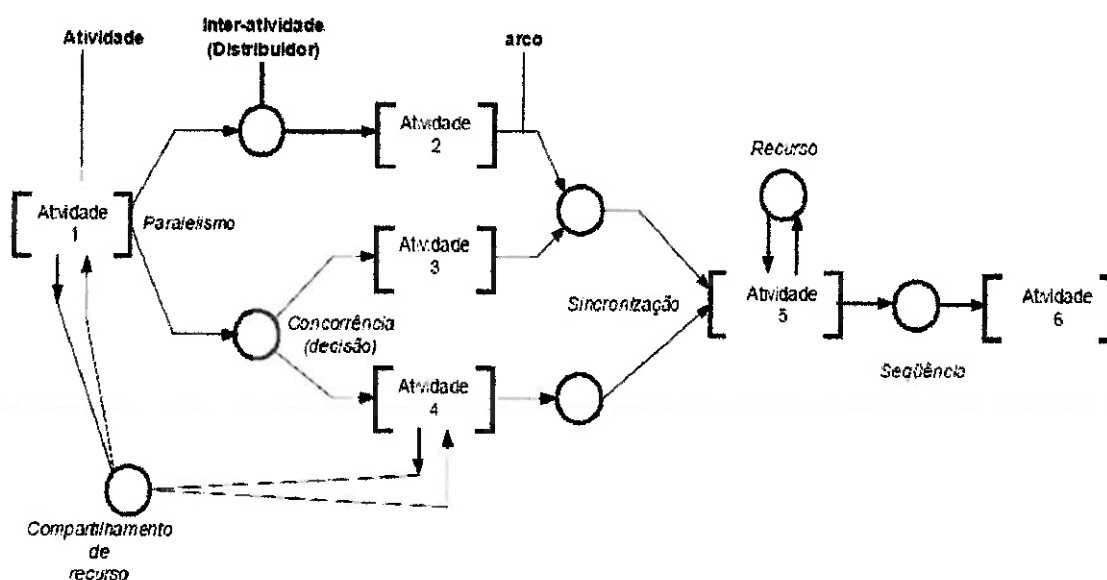


Figura 2.7 - Exemplo de PFS com a identificação de seus elementos estruturais

2.3.2. *Mark Flow Graph (MFG)*

O MFG é um grafo, derivado da RdP, no qual as funções de entrada e saída, a propriedade de segurança, livre de contato etc., são devidamente consideradas, visando a modelagem e o controle dos SED de modo relativamente simples e eficaz.

O MFG é composto pelos seguintes elementos estruturais:

- “Box” que indica uma condição e é representado por um bloco quadrado;
- “Transição” que indica um evento e é representado por uma barra vertical;
- “Arco” orientado que conecta “boxes” e “transições” para indicar a relação entre uma condição e os pré e pós-eventos que o definem. É representado por uma seta;
- “Marca” que indica a manutenção de uma condição e é representada por um ponto negro no interior do “box” correspondente a esta condição;
- “Porta” (ou “gate”) que habilita ou inibe a ocorrência dos eventos correspondentes às “transições” sendo denominada “porta habilitadora” ou “porta inibidora”, conforme a sua natureza, isto é, podem ser sub-classificadas em “porta externa” ou “porta interna” de acordo com a origem do sinal. A “porta habilitadora” possui um círculo negro na extremidade conectada à “transição”. Quando o sinal de origem for “1”, esta porta habilita a “transição” na qual está conectada, compondo um AND lógico com as outras condições que determinam a ocorrência do evento correspondente. A origem do sinal de uma “porta interna” é um “box”. Quando existirem “marcas” no “box”, o sinal é “1”; quando não existirem “marcas” é “0”. A origem do sinal de uma “porta externa” não faz parte do grafo, ou seja, ela indica a entrada de um sinal binário gerado por algum elemento externo;
- “Arco de sinal de saída” que envia um sinal binário do “box” para os elementos externos do grafo e é representado por uma linha que conecta estes dois elementos. Quando houver uma “marca” neste “box”, o sinal é “1”, quando não houver “marca”, o sinal é “0”.

“lugar” e essa “transição” e introduz um número de “marcas” no “lugar” de saída igual ao peso do “arco” correspondente.

A Figura 2.7 ilustra a alteração da “marcação” após o disparo de uma “transição” numa RdP:

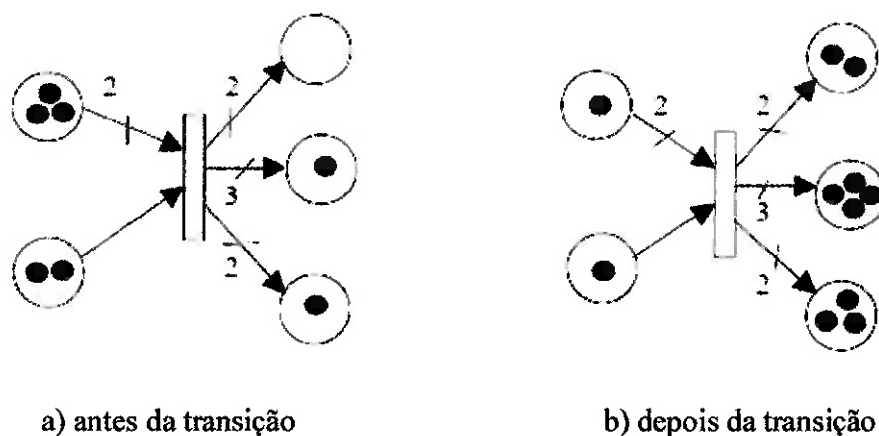


Figura 2.9 - Disparo da “transição” de uma RdP

2.3.4. Simulador de RdP

A RdP possui uma estrutura e comportamento dinâmico que podem ser descritos através de um mapeamento e relações formais entre os elementos que compõe o grafo. Assim, a RdP apresenta uma série de propriedades estruturais e comportamentais. Com base nestas propriedades derivam-se técnicas de análise que caracterizam tanto a estrutura como o desempenho do sistema modelado.

A RdP permite a visualização da evolução dinâmica do sistema modelado através da implementação de um “jogador de marcas” e de uma interface gráfica que formam um tipo de editor e simulador de modelos em RdP.

Assim, explorando essas características, diversos pesquisadores tem desenvolvido um programa para construção e simulação de modelos em RdP. Dentre estes programas o HPSim (Manual HPSim, 2000) é um dos que apresenta uma interface intuitiva de fácil utilização. Entre suas vantagens está a possibilidade do acompanhamento da evolução do estado da RdP de uma forma gráfica, o que auxilia no desenvolvimento do modelo e na identificação de estados do modelo. Ele permite ainda a gravação dos resultados da simulação e o posterior tratamento destes em softwares como o Microsoft Excel, uma

característica essencial para a análise do sistema modelado.

O HPSim pode trabalhar com os seguintes tipos de RdP:

a) RdP Lugar/Transição, no qual a ocorrência das “transições” são tratadas como instantâneas e são disparadas assim que estiverem habilitadas, de acordo com a política de disparo do HPSim. Resumidamente, todas as transições habilitadas são disparadas e só então o tempo é incrementado. O incremento adotado para a evolução do tempo na simulação é definido no campo “Sample Time”. A duração máxima da simulação é definida pelo número máximo de “passos” ou pelo tempo máximo de simulação (o que ocorrer primeiro). A cada “passo” uma ou mais “transições” podem ser disparadas.

b) RdP T-temporal, na qual associa-se um intervalo de tempo a cada “transição”, isto é, uma vez que a “transição” está habilitada deve-se aguardar este intervalo de tempo e em seguida ocorre o disparo. Se durante este intervalo ocorrer um evento que desabilita a “transição”, então o disparo não ocorre e, quando a “transição” se tornar novamente habilitada, inicia-se uma nova contagem do tempo.

c) RdP Estocástica, na qual o tempo associado a cada “transição” não é fixo, mas obedece a uma distribuição estocástica. O simulador HPSim permite a utilização de dois tipos de distribuição do parâmetro do tempo: exponencial e uniforme. A distribuição exponencial é definida pela taxa média de disparo (λ). O tempo médio de disparo de uma “transição” após a sua habilitação é então $\mu=1/\lambda$. A distribuição uniforme é definida por um limite inferior e um limite superior para o tempo de disparo da “transição”. (Manual HPSim, 2002)

O HPSim permite ainda o uso de “arcos” habilitados e inibidores com as mesmas funcionalidades dos elementos em MFG

2.4. “Pacotes” de simulação

Uma outra abordagem para a análise de sistemas é feita através do desenvolvimento de ferramentas de simulação baseadas na manipulação de filas de serviços. Assim, o foco está na conveniência de um ambiente computacional ou “pacote” de simulação direcionado por menus. Os primeiros softwares de simulação tornaram-se populares em aplicações com processos que não exigiam lógicas complexas para a sua modelagem e, por isso, o formalismo do modelo não era considerado como relevante.

Isso é, sistemas relativamente simples podiam ser modelados e verificados rapidamente.

Com a adição constante de complexidade dos sistemas a serem estudados e desenvolvimento de novos conceitos, os “pacotes” de simulação adotaram a teoria de filas para a modelagem de sistemas e se tornaram capazes de tratar problemas práticos com mais eficácia, se tornando produtos comerciais. Dentre estes, apresenta-se aqui o ProModel e o SIMUL8, que têm sido utilizados em diversos casos práticos. Existem muitos outros “pacotes” no mercado mas o foco aqui está na caracterização dos princípios e alguns aspectos comuns a estes softwares.

2.4.1. ProModel

O ProModel, introduzido no mercado em 1988, é um pacote de simulação de utilização simplificada. A construção de um modelo neste ambiente utiliza terminologias e lógicas familiares à maioria dos engenheiros e gerentes de produção. Embora direcionado para sistemas de manufatura, sua flexibilidade tornou possível a sua adoção em outras áreas, notadamente em sistemas de saúde e em empresas de serviços (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000).

A modelagem neste ambiente é feita utilizando-se conceitos como:

1. *Entidades*, que são itens processados através do sistema e podem representar pessoas, documentos ou tudo mais que requer recursos do sistema.
2. *Locais*, que são pontos fixos numa tela de trabalho que representa a planta modelada, através dos quais as entidades se movem. Esses pontos podem estar em qualquer local onde uma entidade é processada. Eles também podem indicar áreas de enfileiramento, armazenamento ou esteiras.
3. *Processamento*, que define as operações efetuadas e o roteamento de cada entidade pelos “locais” do sistema modelado. O “processamento” é específico para cada tipo de “entidade” em cada “local”. A “entidade” pode sofrer uma ação ou simplesmente aguardar o acesso a um “local” subsequente. A sequência de operações considera os tempos e qualquer quantidade de passos lógicos, tais como juntar peças ou capturar recursos.
4. *Chegadas*, que definem a introdução de “entidades” no sistema. São especificadas com a quantidade de cada tipo de “entidade” que entra no sistema. A quantidade

de “chegadas” programadas deve ser definida, mas pode ser infinita, ou seja, contínua enquanto ocorre a simulação. O intervalo entre “chegadas” pode ser definido como uma distribuição probabilística. “Chegadas” cíclicas podem ser definidas utilizando um “ciclo de chegadas”. Assim, a cada período do dia (a cada hora, por exemplo) pode-se ter uma quantidade diferente de pacientes que chegam ao pronto socorro, por exemplo.

5. *Recursos*, que podem ser pessoas, equipamentos ou transportadores, necessários para executar uma ação. Em muitos casos um “recurso” é compartilhado por vários “loais” e se move em um percurso pré-determinado. Características específicas podem ser modeladas como manutenção ou paradas.
6. *Atributos*, que se referem a “entidades” ou “loais”. São variáveis que carregam as características de suas referências.

Uma característica importante do ProModel é a possibilidade de se modelar dados estocásticos. Estes são incluídos no sistema através de distribuições de probabilidade. O “software Stat::Fit” pode trabalhar em conjunto com o ProModel para analisar dados existentes e, utilizando técnicas estatísticas, determinar qual a distribuição que fornece a melhor representação possível (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000).

Na Figura 2.10, pode-se observar a estrutura em forma de tabelas do ProModel. Estas tabelas são utilizadas na criação dos elementos citados (loais, recursos, processamento, etc.). Pode-se observar também a área destinada a construção da visualização gráfica do modelo, que pode ser um fluxograma do sistema ou o layout de uma planta, por exemplo.

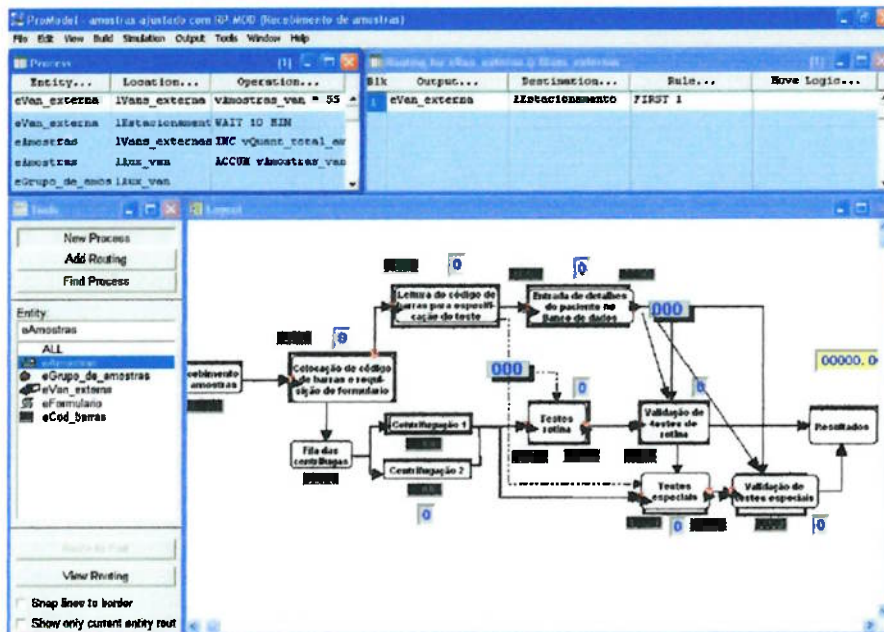


Figura 2.10 - Tela do software ProModel.

2.4.2. *SIMUL8*

O SIMUL8 é, também, um “pacote” de simulação que engloba parte das características citadas do ProModel. Assim, também possui elementos pré-definidos para a construção de sua lógica (centros de trabalho, recursos associados a estes, itens de trabalho, etc.). Porém, a construção do modelo é feita através da construção de um fluxograma e da associação desses elementos e das lógicas dos processos às etapas do fluxograma. A Figura 2.11 mostra uma tela do SIMUL8.

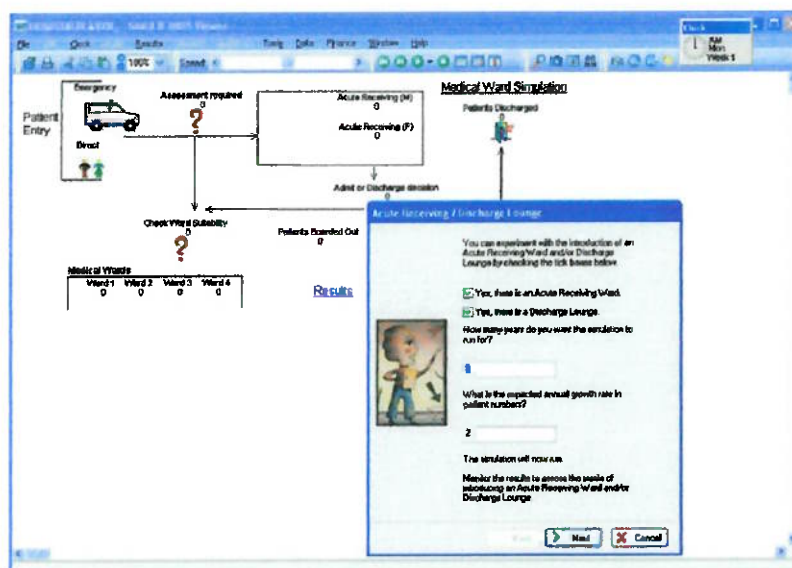


Figura 2.11 - Tela do software SIMUL8.

2.5. Síntese do capítulo

O item 2.1 apresenta um procedimento genérico para se conduzir um estudo através da simulação. É evidenciado que a caracterização do que vai ser objeto de estudo é fundamental, assim como a devida construção do modelo e planejamento dos testes. Assim, no item 2.2, apresenta-se o conceito de SED's, que é a base considerada para a elaboração do modelo de um sistema complexo que envolve não só máquinas como operadores humanos. Dentre as técnicas de modelagem, a RdP foi introduzida, assim como, entre as ferramentas de simulação disponíveis no mercado, citou-se o ProModel e o SIMUL8.

Apesar da relação evidente entre os procedimentos, conceitos, teorias e ferramentas apresentadas, as informações e os textos técnicos costumam focar apenas em particularidades próprias de cada uma destas partes, não descrevendo de modo claro e explícito qual é o relacionamento entre elas e que tipo de dado ou informação são compartilhados em aplicações práticas.

3. Estudo de caso

Em função do problema levantado no item 2.5, considera-se que uma sistematização dos processos que envolvem um estudo através de técnicas de simulação pode ser mais bem conduzida através de um caso prático.

Assim, os candidatos a este caso prático poderiam ser sistemas de manufatura, sistemas logísticos, sistemas de serviços, sistemas de comunicação, etc. Para que o foco fosse mantido, apesar das inúmeras opções citadas, este trabalho se concentrou em torno da área de serviços de saúde, em função da natureza desses sistemas, relacionada a interação homem-homem, homem-equipamento, máquina-máquina e diferentes graus de restrições temporais. Isto é, são sistemas complexos e nos quais as técnicas de simulação têm papel estratégico na tomada de decisões.

Além disso, é importante que já se disponha de dados do sistema e das simulações já realizadas para que o presente trabalho tenha elementos para comparar e validar seus resultados.

Desta forma, o estudo de caso considerado foi retirado de COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002), que envolve o laboratório bioquímico do hospital Ysbyty Gwynedd, em North Wales, que é uma instituição de médio porte. O laboratório bioquímico deste hospital é equipado para realizar dois tipos de exames: exame de rotina e exame especial. Cada exame pode ter diversos testes, dependendo das amostras, que são os materiais coletados de cada paciente. Por ser único na região, este laboratório recebe amostras de diversos outros postos de saúde, clínicas e pequenos hospitais, além de processar amostras internas do próprio hospital.

Através da observação e levantamento de dados, percebe-se que o número de amostras que o hospital recebe tem aumentado cerca de 20% a cada ano. Isto se dá pois é constante o desenvolvimento de novos procedimentos e técnicas que exigem a realização de mais exames e, também, porque a expectativa de vida dos cidadãos comuns aumenta a cada ano. O estudo de COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) foi desenvolvido com o objetivo de se entender como este crescimento afetará o tempo de resposta do laboratório em seu atendimento e quais são as alternativas possíveis. A simulação foi utilizada, portanto, para se prever os efeitos da carga de trabalho crescente, a troca de

alguns processos por outros automáticos e mudanças operacionais.

O trabalho de COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) passou por uma fase de observação direta e entrevistas com os funcionários, uma fase de medição de tempos de processos e outra de acompanhamento junto aos gestores do hospital. Foi utilizado o “pacote” de simulação SIMUL8, que utiliza o conceito de modelagem na forma de blocos de processos, mas que pode detalhar “entidades” e “recursos”, assim como dados estatísticos.

3.2. Descrição do Processo

O laboratório do hospital recebe amostras de pequenos hospitais próximos (amostras externas) e também de seus próprios pacientes (amostras internas). As amostras externas são recebidas através de vans. As amostras internas chegam durante o dia, sem horários pré-determinados, mas obedecendo a uma tendência.

As amostras (internas e externas) são recebidas no mesmo local e, a partir deste ponto, são tratadas de forma indistinta. Ao chegar na área de recebimento, as amostras formam um pacote, que então é levado até uma área de colocação de código de barras e requisição de formulário.

A partir deste ponto dois fluxos distintos surgem: o fluxo da amostra (que sofrerá os exames e será acompanhada através de seu código de barras) e o fluxo dos formulários (que servirá tanto para indicar quais exames devem ser feitos, quanto para, após a realização destes, facilitar o armazenamento e a divulgação dos resultados). Estes dois fluxos, embora distintos, são dependentes, pois nenhum exame pode ser feito até que o formulário esteja pronto e nenhum dado pode ser inserido no banco de dados até que os resultados dos exames fiquem prontos. Portanto, o tempo total de uma amostra no sistema é determinado pelo caminho mais longo.

No fluxo dos exames, o primeiro processo é a centrifugação de todas as amostras. Duas centrífugas estão disponíveis. As amostras centrifugadas podem sofrer exames de rotina, exames especiais ou ambos. Uma vez escolhido o caminho a ser tomado, existe também a verificação quanto ao número de testes a serem realizados para aquele exame. Isso influencia no tempo total que a amostra passará em análise, que é igual ao tempo de

duração de cada teste mais um tempo de incubação (tempo que a amostra deve esperar até o resultado do exame), fixo para todas as amostras.

As amostras que devem realizar os dois tipos de exames vão primeiramente para a área de exames de rotina e, depois de analisadas e validadas, vão para os exames especiais.

Após do processamento das amostras, estas são levadas para áreas de validação. Nestas, os exames são analisados e os resultados são agregados aos respectivos formulários, para então serem armazenados e reportados.

A rota dos formulários se inicia com o cadastramento dos códigos de barras de todas as amostras individualmente no sistema do hospital. Neste cadastramento, são informados ao sistema quais os testes requisitados para cada amostra. Isto possibilita que os técnicos da análise saibam, através da leitura do código de barras que acompanha a amostra, o que realizar.

Todos os processos citados exigem a presença de funcionários presentes. Alguns deles, como o cadastramento dos formulários, podem ser feitos por mais de um funcionário simultaneamente. A equipe tem um esquema de horários e turnos diferentes para cada membro e existe uma diferenciação entre os técnicos (que podem processar as amostras) e os funcionários que cuidam da parte operacional.

A modelagem realizada por COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) não levou em consideração as diferenças entre os tipos de funcionários. Desta forma, um técnico pode ser utilizado, no modelo feito em SIMUL8, para a especificação de testes e entrada no banco de dados. Essa simplificação pode causar desvios na resposta da simulação, mas foi considerada de pouca importância, pois existem limitações quanto ao número de funcionários a serem alocados ao mesmo tempo em cada setor.

As limitações quanto ao número de funcionários a serem alocados simultaneamente em cada setor estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Limites de funcionários em cada setor.

Processo	Limite imposto	Motivo
Colocação do código de barras	Máximo de 3 funcionários	Espaço físico limitado
Centrífuga	Máximo de 1 funcionário por centrífuga	Acesso limitado às centrífugas
Entrada de dados dos pacientes	Máximo de 3 funcionários	Limitado pelo número de computadores
Validações	Máximo de 1 funcionários por laboratório	Limitado pelo número de computadores

3.3. Dados estimados

O trabalho de COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) não apresenta todos os dados considerados para a construção do modelo. Desta forma, alguns dados foram estimados. Esta estimativa baseou-se em comparações com outros dados do modelo.

- Tempo para a validação de exames de rotina: este tempo é considerado para todas as amostras que realizam exames de rotina. Após o exame, é necessário que cada resultado seja avaliado individualmente e seja anexado ao seu respectivo formulário. Desta forma, uma amostra já analisada permanece em uma fila de amostras, assim como os formulários respectivos permanecem em fila. Isso ocorre até que um funcionário realize a validação, no tempo determinado. Estima-se que na simulação foi utilizado o tempo de 60 segundos por validação.

- Tempo para a validação de exames especiais: este tempo é considerado para todas as amostras que realizam exames especiais. Também necessita que um funcionário realize a validação, no tempo determinado. Estima-se que foi utilizado o mesmo tempo de 60 segundos por validação.

- Tempo de entrada de dados dos pacientes no banco de dados: funcionários devem colocar os dados relacionados aos pacientes no banco de dados através dos formulários. Este tempo é importante, pois, apenas com os formulários prontos pode-se iniciar a validação. Estima-se que foi utilizado o tempo de 45 segundos.

3.4. Modelo do SIMUL8

O modelo do estudo de caso utilizado por COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) e desenvolvido em SIMUL8 pode-ser visto na Figura 3.1. Observa-se que o modelo foi desenvolvido com a forma de um fluxograma, contendo as principais atividades do sistema, como foi citado no item 2.4.2, o SIMUL8 exige a construção de um fluxograma do sistema para a posterior inserção das lógicas que caracterizam os processos.

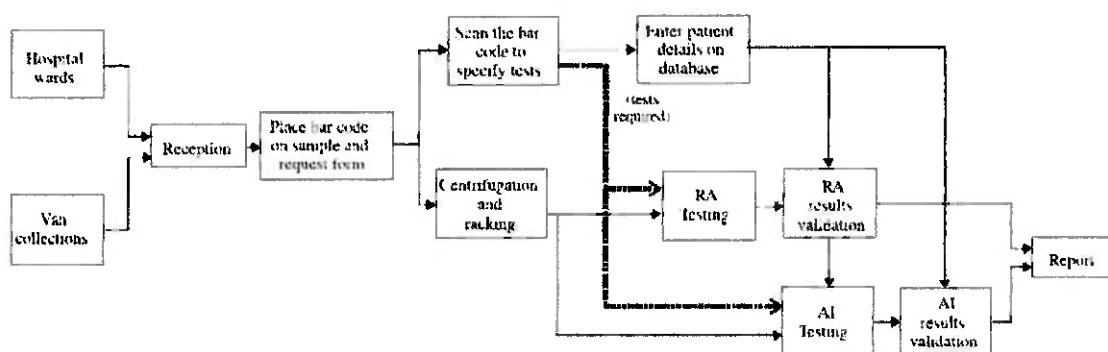


Figura 3.1 - Modelo do estudo de caso utilizado por COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002).

Para se observar os resultados da simulação empregada em seu trabalho, quatro pontos de filas de elementos (amostras e formulários) foram escolhidos por COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002) para uma análise detalhada. Estas filas foram escolhidas por antecederem processos cruciais para o sistema, que muitas vezes tendiam a ser gargalos da operação. Estes pontos são:

- a fila de amostras e formulários que esperam a colocação do código de barras (cujo perfil, resultante da simulação, pode ser visto na Figura 3.2);
- a fila de amostras a sofrerem exames de rotina na máquina analisadora auxiliar, que funciona apenas durante o dia (este perfil pode ser visto na Figura 3.3);
- a fila de formulários para a atualização dos dados dos pacientes no banco

de dados (cujo perfil pode ser visto na Figura 3.4);

- a fila de amostras que esperam a validação de seu exame de rotina (cujo perfil pode ser visto na Figura 3.5).

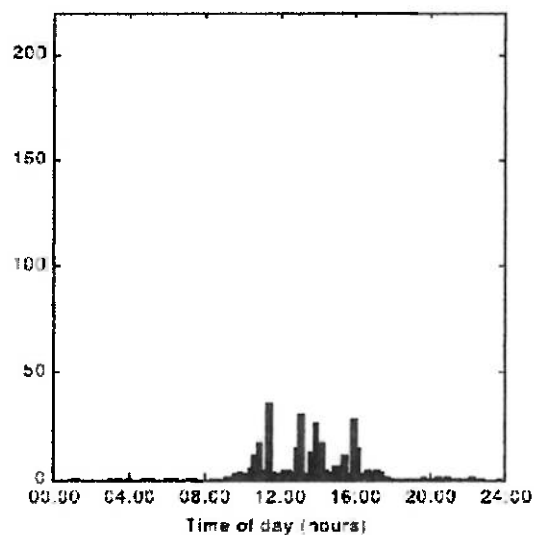


Figura 3.2 - Fila de colocação do código de barras no modelo do SIMUL8.

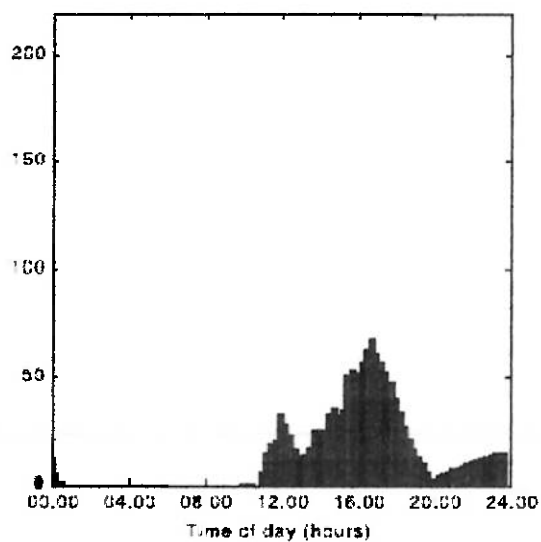


Figura 3.3 - Fila do segundo analisador de exames de rotina no modelo do SIMUL8.

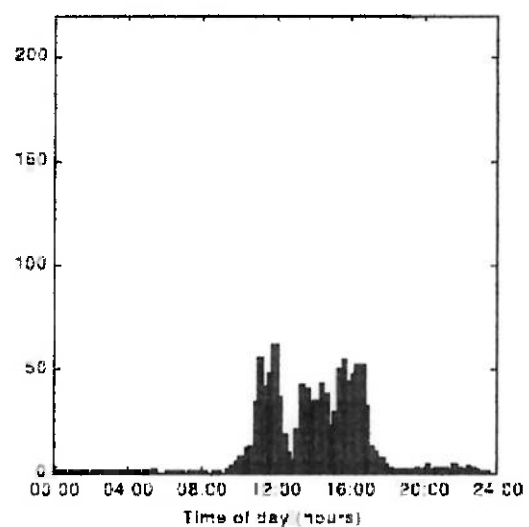


Figura 3.4 - Fila de entrada de dados dos pacientes no banco de dados no modelo do SIMUL8.

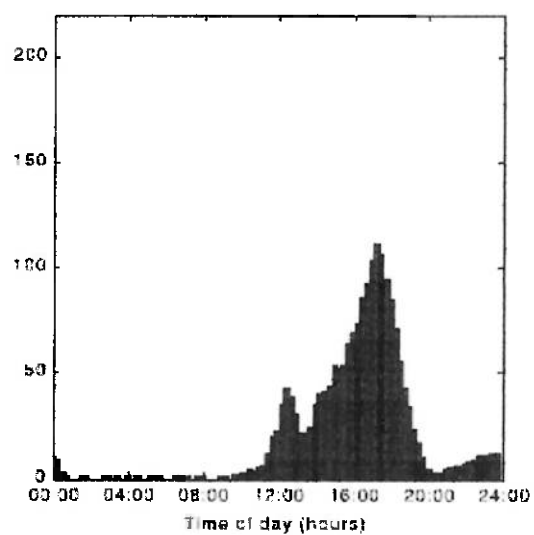


Figura 3.5 - Fila de validação dos exames de rotina no modelo do SIMUL8.

4. Modelagem e Análise Qualitativa

4.1. Modelo Conceitual em PFS

Abaixo o modelo conceitual do sistema, criado seguindo a metodologia PFS. Nesta etapa a modelagem de cada um dos elementos estruturais do sistema é abordada de forma sistemática e hierárquica, sendo sua característica considerar inicialmente um nível conceitual (BASTIDAS, 1999). O principal fluxo considerado é o das amostras e o fluxo das informações relacionadas com cada amostra.

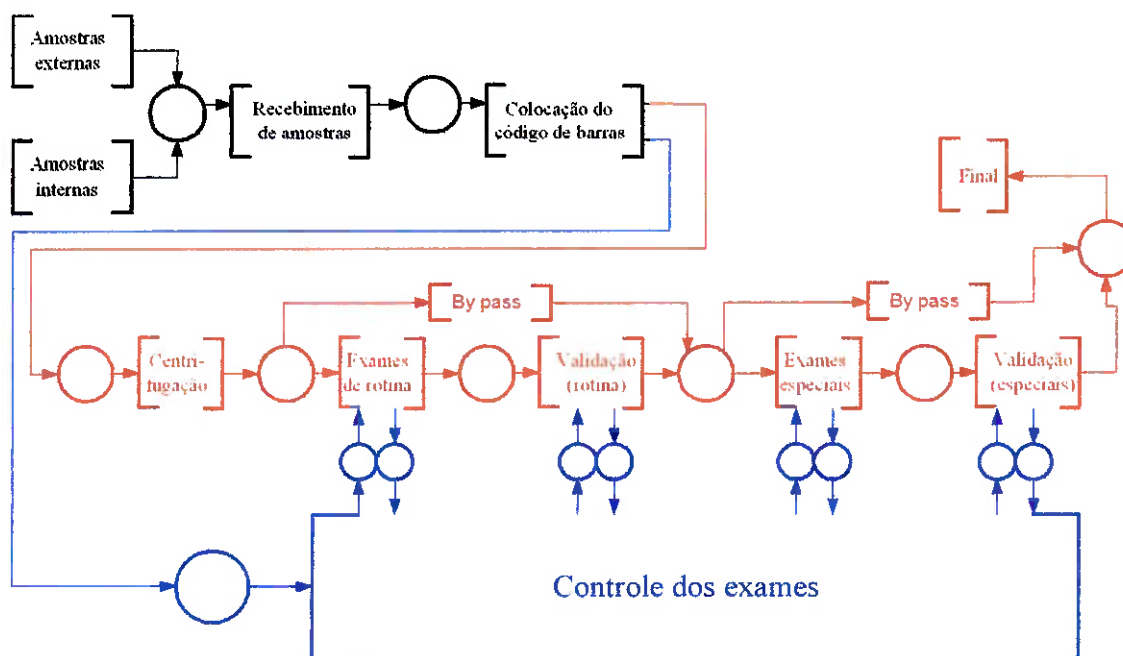


Figura 4.1 - PFS

4.2. Modelagem funcional em MFG

A modelagem funcional compreende o comportamento dinâmico do sistema, para a sua concepção foi adotado o MFG, que corresponde ao detalhamento de cada uma das atividades.

a) Chegada de amostras em vans:

As amostras externas são recebidas 6 vezes por dia através de vans. Estas trazem sempre 55 amostras e chegam em horários marcados, havendo uma variação de alguns minutos nesta chegada (a agenda de chegadas pode ser vista na Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Agenda de chegadas de amostras externas

(a variação é dada em $\pm X$ min.).

Vans	Horário de chegada	Variação (min.)
A	11:15	10
B	13:10	10
C	13:45	15
D	15:00	10
E	15:30	20
F	16:05	15

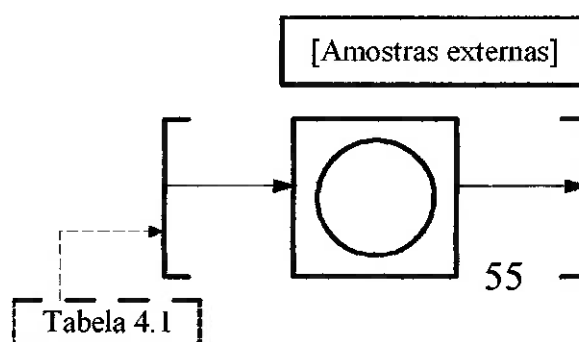


Figura 4.2 – Grafo em MFG da chegada de amostras externas.

b) Amostras do hospital:

As amostras internas chegam conforme uma tendência que pode ser aproximada por uma distribuição exponencial. Esta tem sua média variável ao longo do dia e ao longo da semana (conforme a Tabela 4.2). Desta forma, é possível modelar a chegada de amostras através de sorteios estatísticos que variam segundo o período de tempo (dependem da hora do dia e do dia da semana).

Tabela 4.2 - Distribuição de chegadas de amostras internas.

Dia da semana	Hora de início do período	Número de amostras por hora	Intervalo médio entre chegadas (min.)
Sábados e Domingos	0:00	1	60
	9:00	120	0.5
	9:30	7.5	8
	22:30	1	60
Terças e Quintas	0:00	1.1	55
	9:00	60	1
	10:30	200	0.3
	11:00	40	1.5
	17:30	10	6
	22:30	1.1	55
Segundas, Quartas e Sextas.	0:00	1	60
	9:00	60	1
	10:30	170	0.35
	11:00	30	2
	17:30	7.5	8
	22:30	1	60

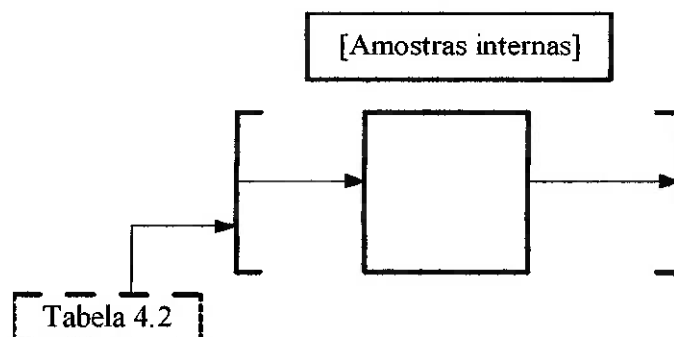


Figura 4.3 – Grafo em MFG da chegada de amostras internas.

c) Recebimento de amostras:

Ao chegar na área de recebimento, as amostras esperam até que 50 possam formar um pacote, que então é levado até uma área de colocação de código de barras e requisição de formulário.

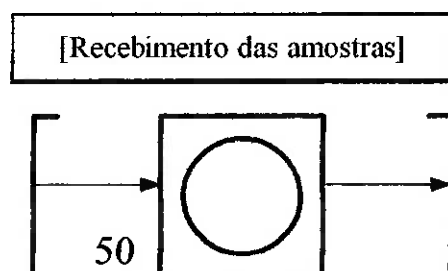


Figura 4.4 – Grafo em MFG do recebimento de amostras.

d) Colocação do código de barras:

Cada amostra deve receber um código de barras para associá-la ao seu formulário. A variação do tempo deste processo é uma distribuição exponencial com média igual a 0,25 minutos e sua realização depende da disponibilidade de um funcionário da clínica. Até 3 funcionários podem executar esta função ao mesmo tempo.

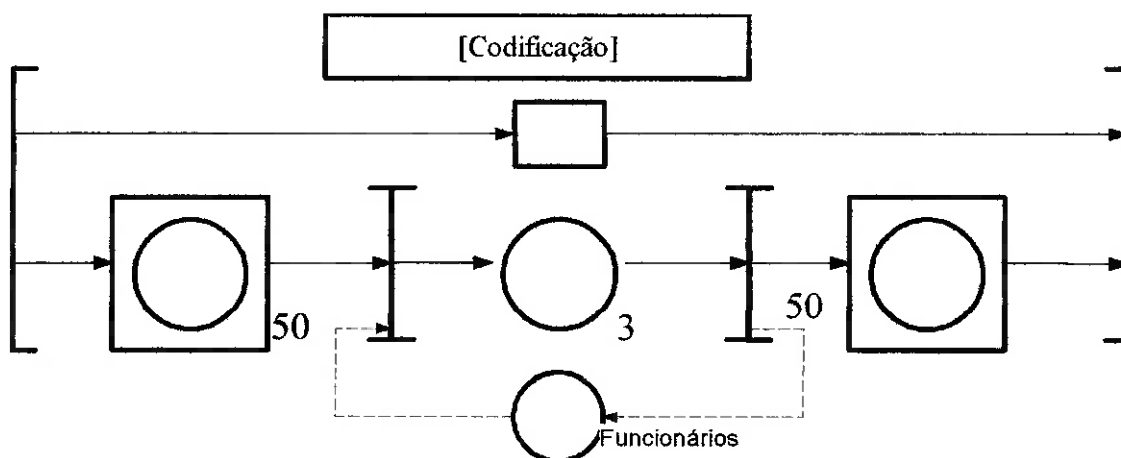


Figura 4.5 – Grafo em MFG da colocação do código de barras.

e) Controle dos exames:

Esta atividade pode ser dividida em duas partes. Inicialmente existe a leitura do código de barras de cada amostra que exige a presença de um funcionário (máximo de 3 simultâneos) e leva o tempo de 0,5 minutos. Essa leitura é feita para que se saiba quais exames devem ser realizados em cada amostra. Isso ocorre segundo uma proporção

(Tabela 4.3a). É feita também a verificação quanto ao número de testes a serem realizados (Tabela 4.3b). A distribuição do número de testes nos exames de rotina realizados segue o padrão da Figura 4.1.

Tabela 4.3a – Proporção de cada tipo de exame.

Tipo de exame	Proporção das amostras
Rotina	65%
Especial	10%
Ambos	25%

Tabela 4.3b – Testes realizados em cada exame.

Tipo de exame	Número de testes por amostra	Duração dos testes por amostra (s)	Tempo de incubação (min.)
Rotina	de 1 a 20	12	8,3
Especial	de 1 a 3	40	18,0

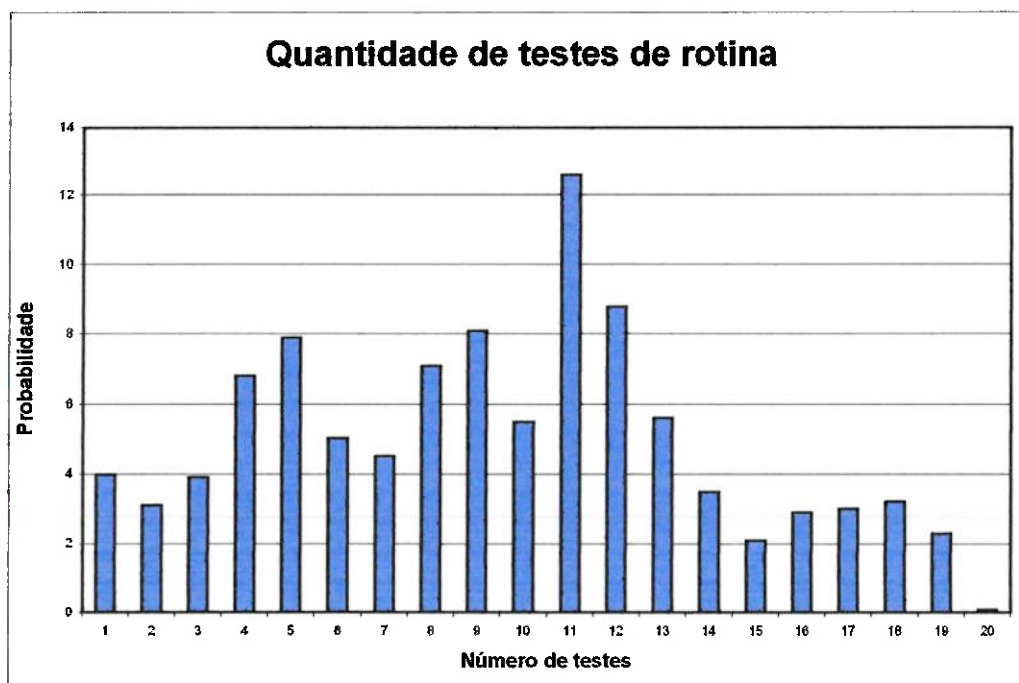


Figura 4.6 – Distribuição de probabilidade do número de testes nos exames de rotina a serem realizados.

A outra parte envolve a atualização dos dados das amostras no banco de dados, o que é feito por no máximo 3 funcionários por vez e leva o tempo de 1 minuto.

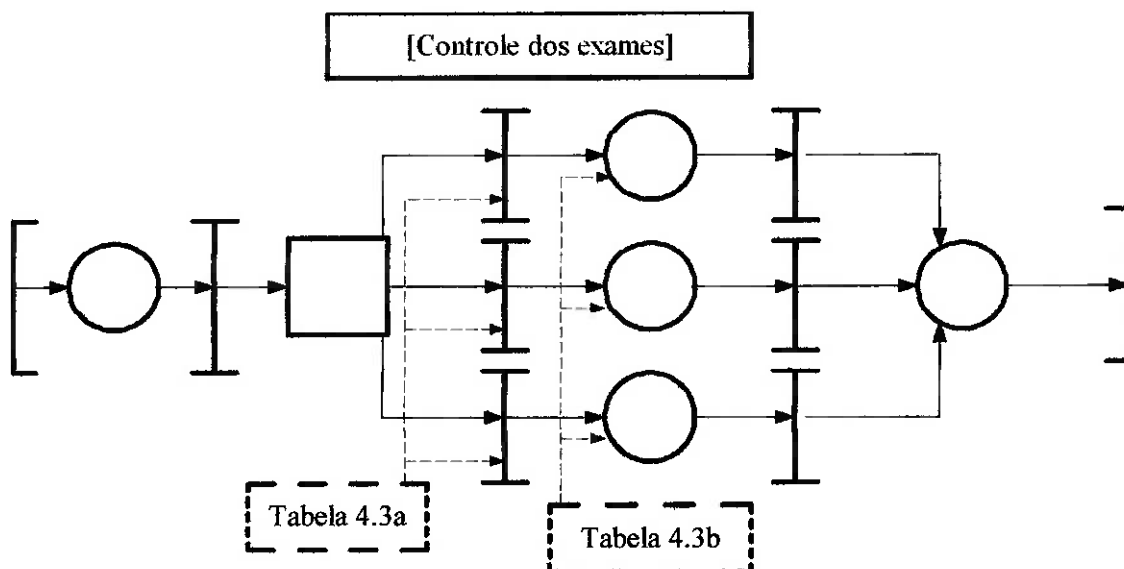


Figura 4.7 – Grafo em MFG do controle dos exames.

f) Centrifugação:

Dois recursos (centrífugas) são disponíveis, processando até 48 frascos por vez cada. Para o carregamento da centrífuga, um funcionário gasta o tempo fixo de 0,5 minutos por amostra e então é liberado para outras funções, já que a centrífuga opera automaticamente. A operação da centrífuga termina em exatos 5 minutos e, então, é necessário que um funcionário descarregue-a, o que dura um tempo de 0,05 minutos por amostra descarregada.

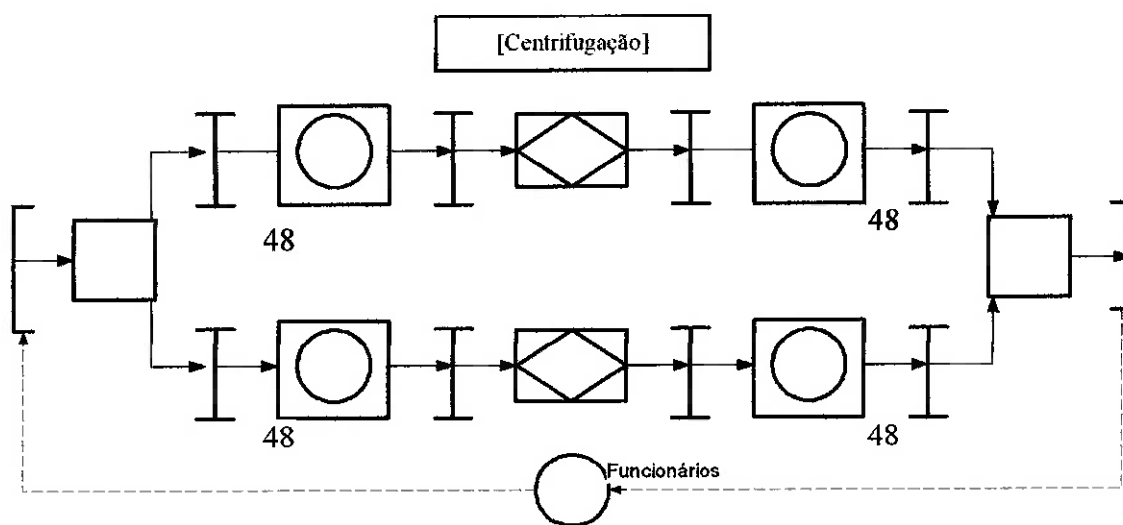


Figura 4.8 – Grafo em MFG da centrifugação de amostras.

g) Exames de rotina:

O tempo que as amostras levam para serem processadas é a soma de um tempo fixo, igual para todas as amostras (tempo de incubação), mais um tempo variável de acordo com o número de testes realizados. Os tempos de cada teste e de incubação estão na Tabela 4.3b.

Para este procedimento um técnico deve estar presente durante os testes e uma das máquinas de análise deve estar disponível. Nos exames de rotina existem duas máquinas, mas estas só operam simultaneamente durante o dia (das 9:00h as 21:00h), permanecendo apenas uma máquina ligada a noite.

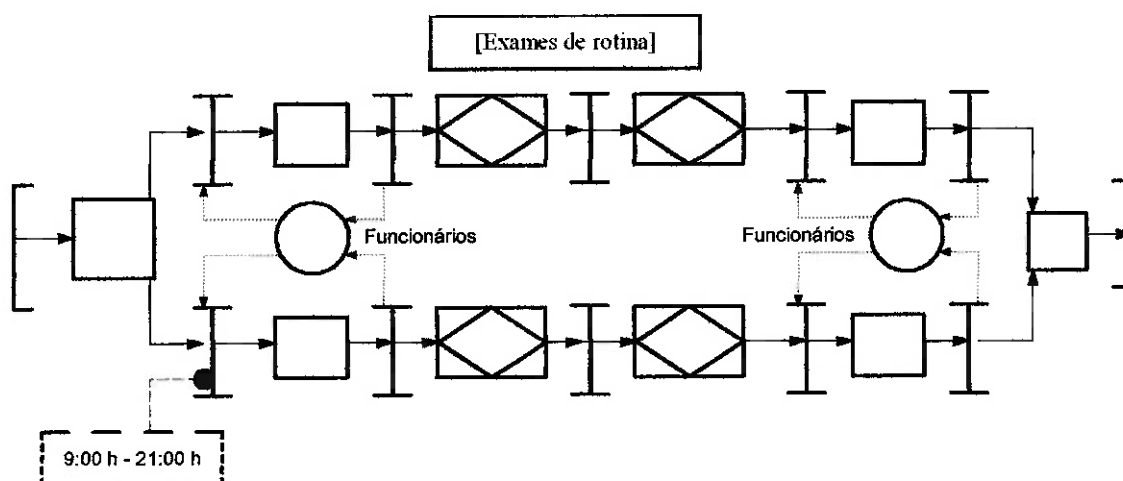


Figura 4.9 – Grafo em MFG dos exames de rotina.

h) Validação dos testes de rotina:

Os exames são analisados e os resultados são agregados aos respectivos formulários, para então serem armazenados e reportados. Portanto, é necessário que o formulário esteja pronto no momento em que a amostra chegue à validação, caso contrário esta deve esperar. Para a validação um funcionário também deve estar disponível e o processo dura 1 minuto.

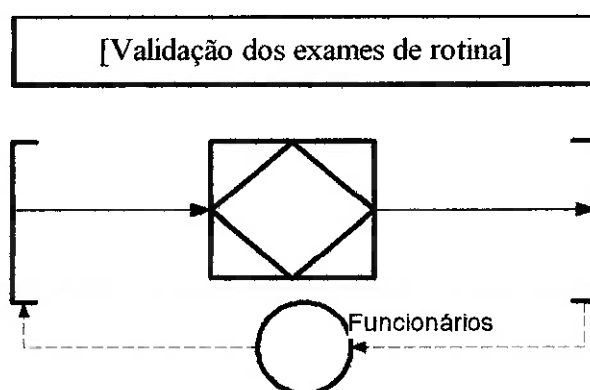


Figura 4.10 – Grafo em MFG da validação de exames de rotina.

i) Exames especiais:

A mesma lógica dos exames de rotina é utilizada no caso dos exames especiais. Os tempos destes exames estão na Tabela 4.3b.

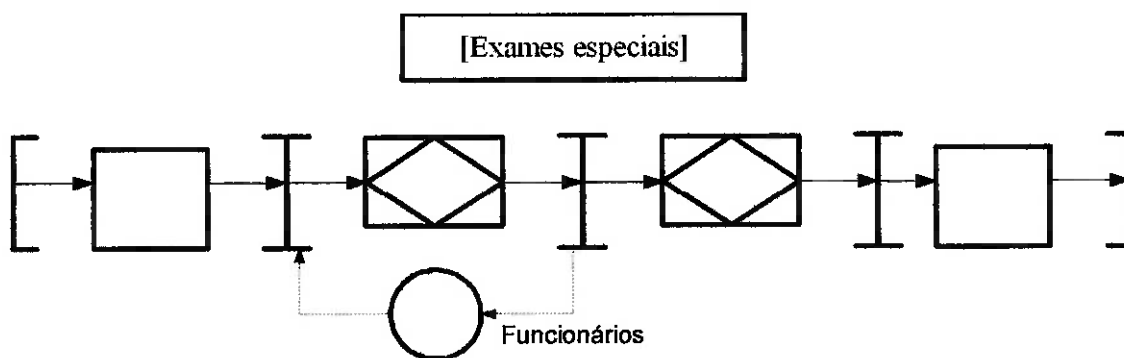


Figura 4.11 – Grafo em MFG dos exames especiais.

j) Validação dos testes especiais:

A mesma lógica da validação dos exames de rotina é utilizada no caso da validação dos exames especiais. O tempo de validação também é de 1 minuto.

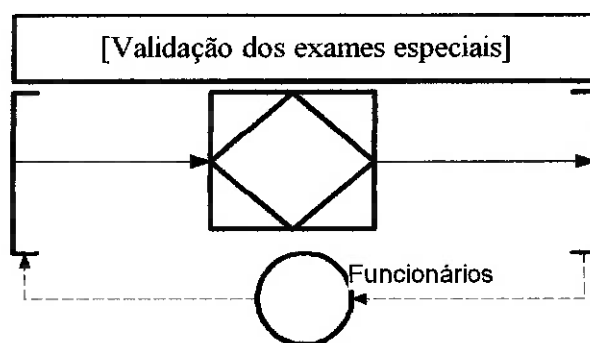


Figura 4.12 – Grafo em MFG da validação de exames especiais.

4.2.1. Análise qualitativa

Com base no PFS/MFG, o modelo em RdP é editado no simulador HPSim. Em função das limitações existentes na versão do HPSim utilizado, o modelo PFS/MFG foi devidamente adaptado para poder ser trabalhado neste programa.

Na edição dos grafos, o HPSim indica possíveis erros estruturais e com a execução das regras de disparo, pode-se verificar se o comportamento do grafo, isto é, do modelo, está de acordo com as especificações.

Explorando ainda a estruturação imposta pelo PFS, os modelos em MFG ou RdP de cada atividade são analisados individualmente, seguindo então aos subconjuntos combinados em partes maiores até a avaliação de toda a estrutura. Este procedimento assegura uma análise qualitativa da estrutura do sistema, isto é, da estrutura das atividades e funções envolvidas.

O HPSim pode ainda ser utilizado para analisar alguns aspectos específicos das atividades do sistema. Assim, a título de exemplo, citam-se alguns casos que foram analisados em relação ao estudo de caso:

- Escala Temporal

A escala temporal foi modelada com ativações de hora em hora e, quando necessário, foram criadas escalas intermediárias, como se pode observar na Figura 4.2.

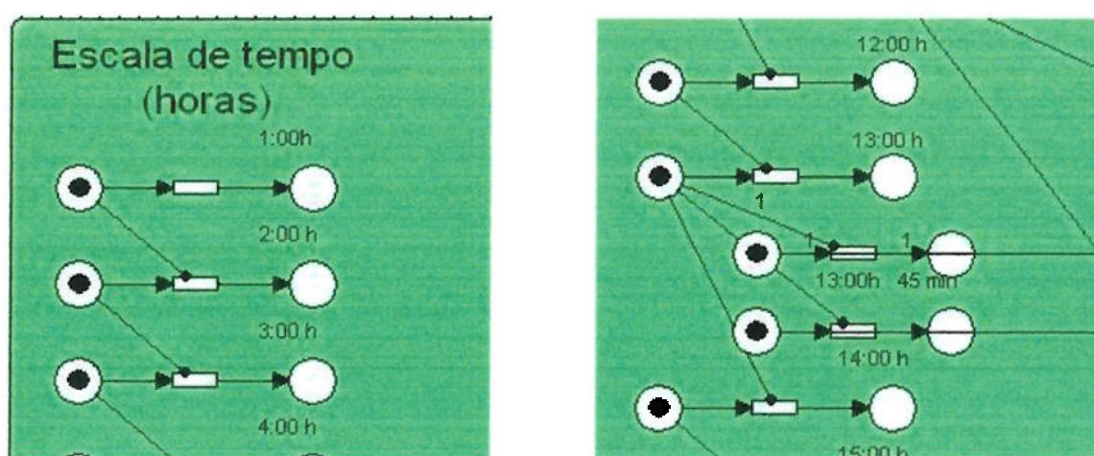


Figura 4.13 - Detalhe da escala temporal em RdP

- Chegadas de Amostras

São dois os tipos de amostras, as internas e as externas, que chegam por meio de vans. A chegada de amostras é ativada de acordo com a escala de tempos e é feita de forma separada como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4.

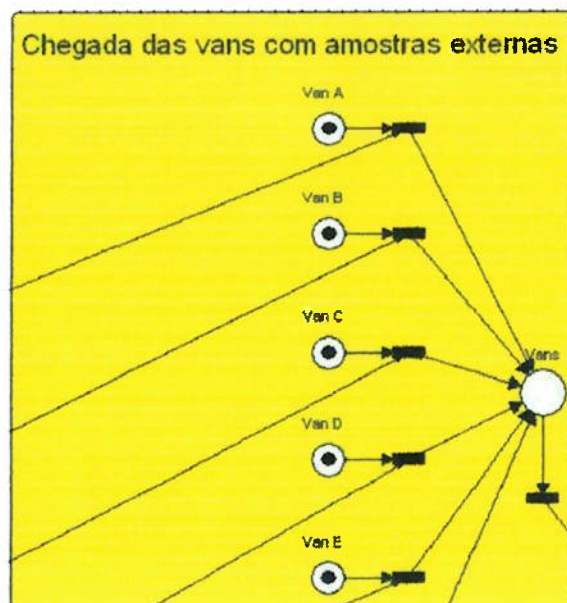


Figura 4.14 - Chegada de amostras externas.

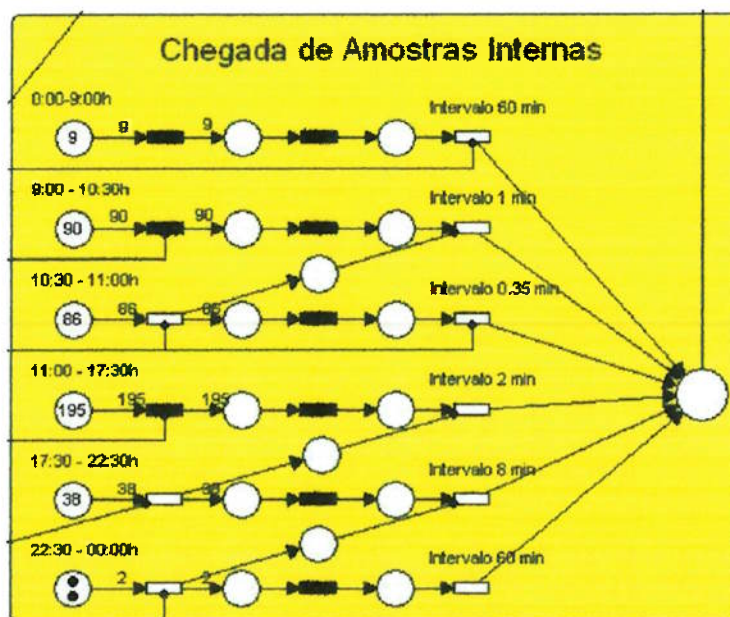


Figura 4.15 - Chegada de amostras internas.

- Recebimento de Amostras

Após a chegada das amostras é feito o seu “recebimento”, um funcionário é requisitado para essa tarefa. É nessa etapa que é feito um sorteio para determinar qual o tipo de teste que cada amostra realizará, o que determina o caminho a ser seguido por essa amostra. Além disso, cada amostra deve gerar um “formulário”, que a acompanhará até o fim dos exames. Este conjunto de ações pode ser visto na Figura 4.5.

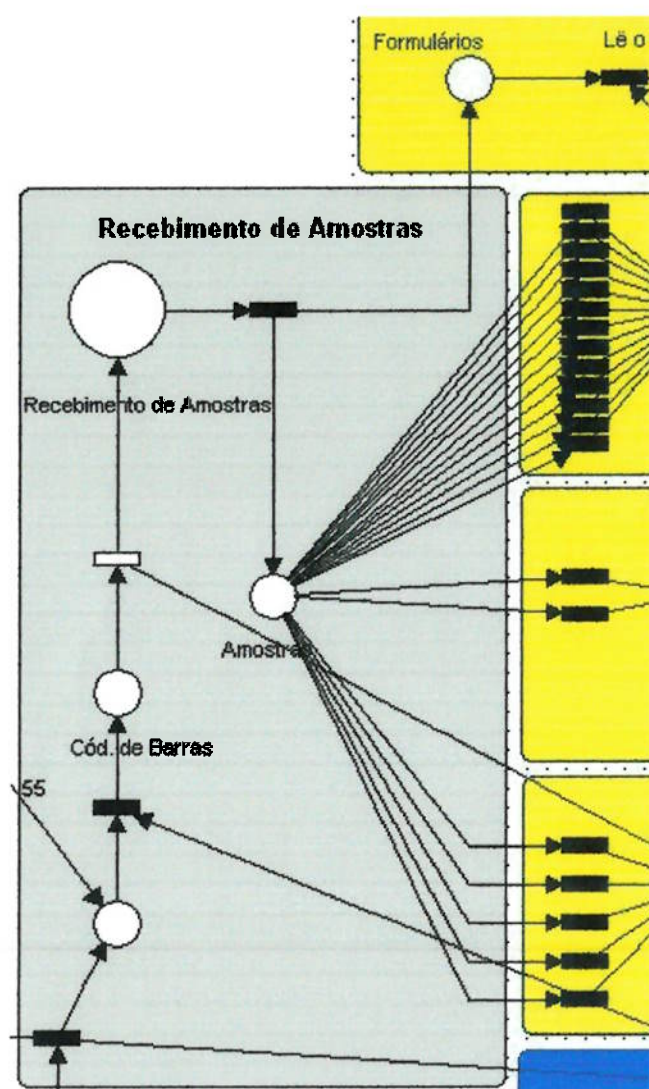


Figura 4.16 - Recebimento de amostras.

- Centrífugas

A Figura 4.6 mostra o caminho das amostras pelas duas centrífugas, cada uma delas é carregada até a sua capacidade máxima e entra em operação, a partir daí a outra começa a ser carregada. Os tempos do processo estão divididos em tempo de carregamento, tempo de centrifugação e tempo de descarregamento.

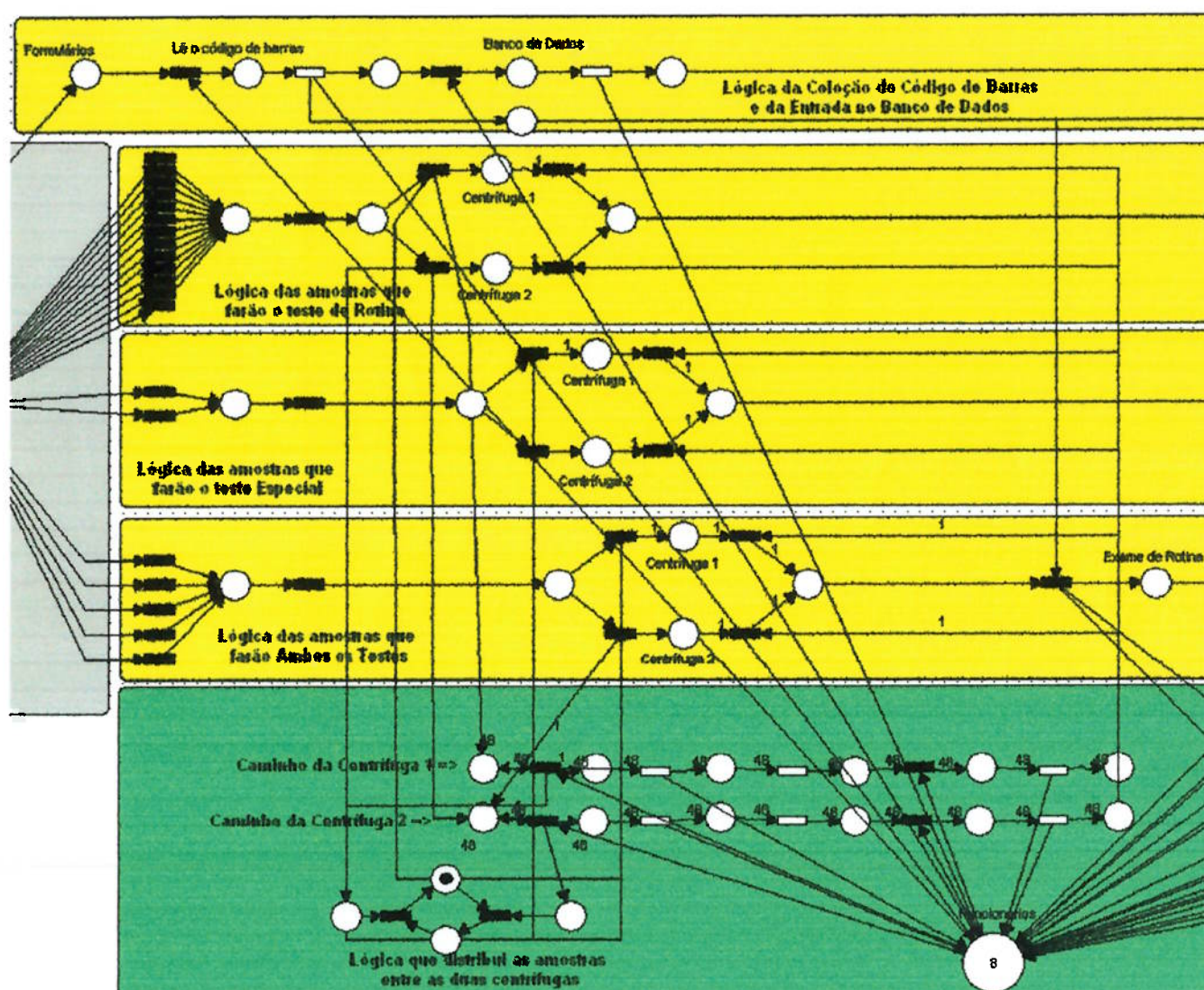


Figura 4.17 - Detalhe das restrições lógicas e físicas das centrífugas

- Analisadores e Validação

Após o processo de centrifugação as amostras são levadas para os analisadores. Nos analisadores existem tempos para carregamento, descarregamento e para cada tipo de exame os tempos são diferentes, além disso, o Analisador 2 fica ligado apenas 12 horas (das 9:00 às 21:00) (Figura 4.7).

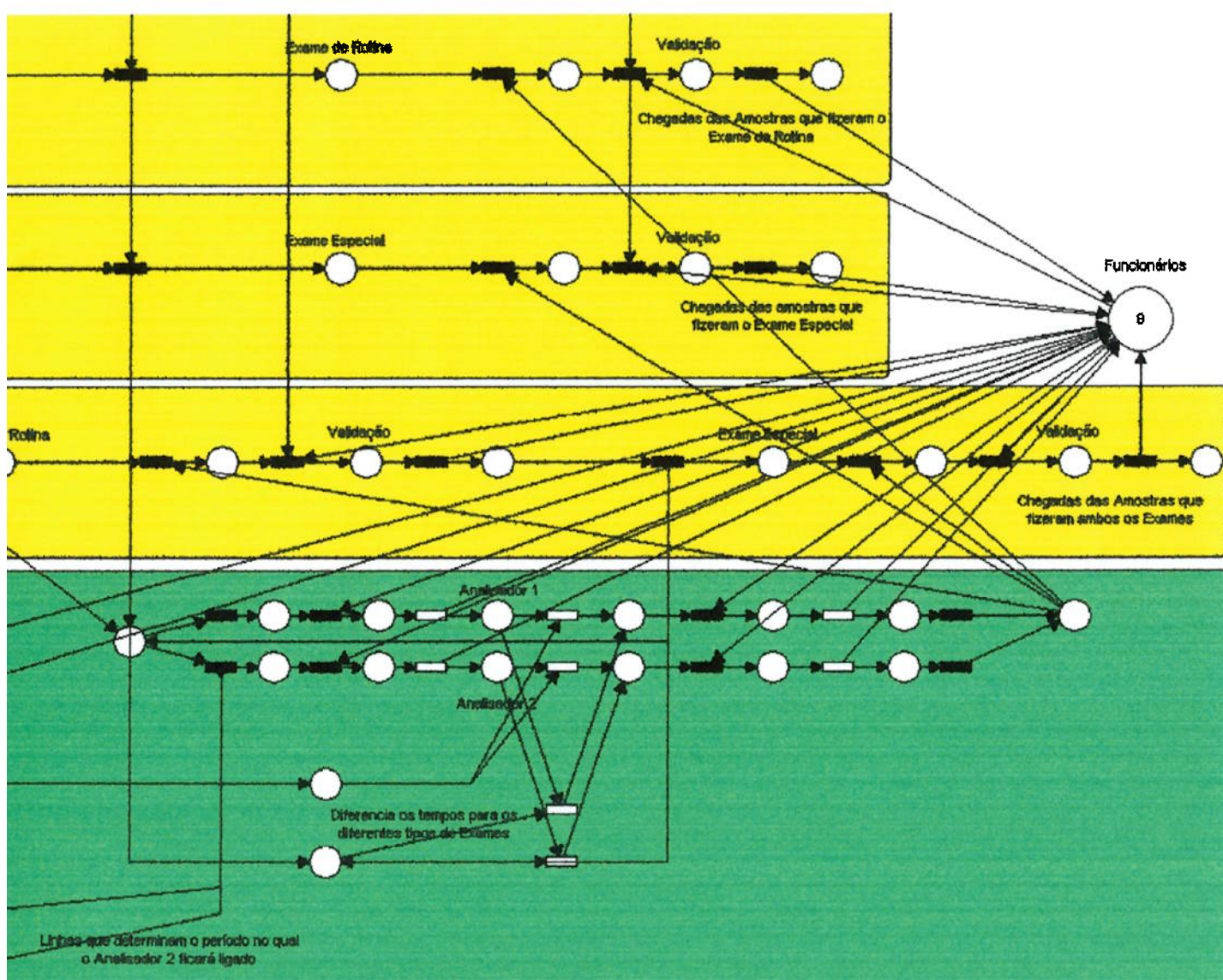


Figura 4.18 - Detalhe do esquema lógico e físico dos analisadores.

5. Análise Quantitativa

Para a análise quantitativa do sistema, observa-se que programas, como o HPSim, apresentam uma série de limitações, em especial em relação à forma como se obtém e são armazenados os dados resultantes da simulação do sistema. Assim, para este tipo de análise deve-se considerar o uso de ferramentas e ambientes computacionais mais adequados, como o ProModel.

Com essa abordagem, o PFS descrito no item 4.1 pode ser visto agora como uma especificação da estrutura do sistema e o MFG correspondente às atividades (item 4.2) como uma especificação funcional das partes que compõe o sistema.

Baseado assim no PFS/MFG, realiza-se a conversão destes para um modelo de entrada de dados do ProModel. A Figura 5.1 mostra o modelo resultante. Ele foi construído na forma de fluxograma, sendo facilmente identificados os fluxos de “formulários” (caminho superior do fluxo) e “amostras” (caminho inferior do fluxo).

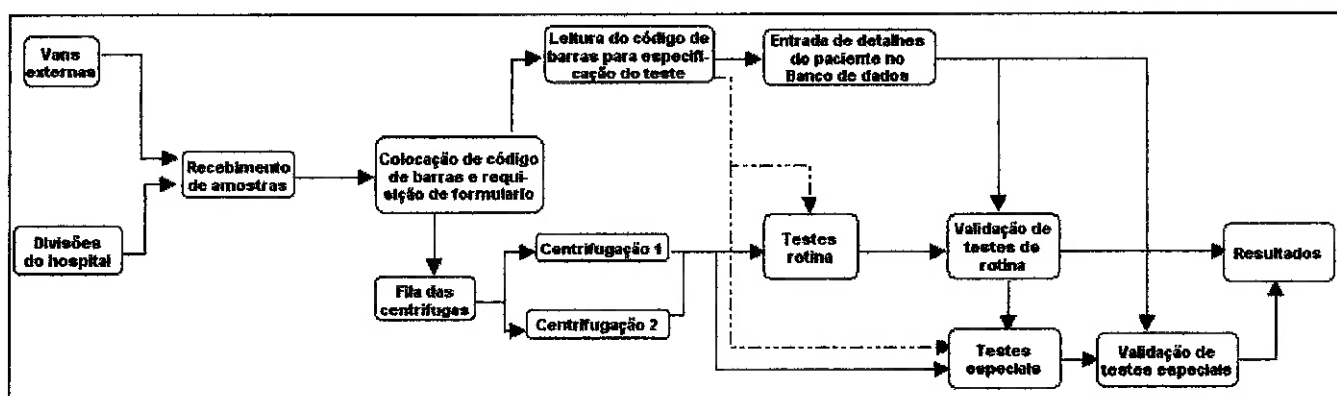


Figura 5.1 - Modelo do ProModel.

O diagrama PFS do item 4.1 é utilizado como base na definição dos “locais” na modelagem no ProModel. Ou seja, os principais pontos de realização de processos são exatamente os indicados no diagrama e visualizados no modelo.

A detalhamento feito para o MFG (item 4.2) é utilizado, então, na modelagem dos processos e construção das lógicas. Os tempos de cada etapa, o número de funcionários necessário e máximo e a sequência de operações foi retirada diretamente deste detalhamento.

5.1. Validação dos modelos

A validação do modelo no ProModel foi realizada a partir da comparação dos resultados, reportados por COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002), de quatro aspectos chave do sistema, com os resultados obtidos com o presente procedimento.

5.1.1. Fila da colocação do código de barras

O perfil da fila de amostras para colocação de códigos de barra (Figura 5.2) indica que esta recebe “pacotes” de amostras, contendo 50 unidades por vez. Desta forma, seus picos máximos são, normalmente, de 50 amostras. O perfil da mesma fila no modelo do ProModel apresenta 14 picos de 50 unidades, mas existe uma concentração destes ao redor das 11 horas, com pequena sobreposição, o que resulta em um pico máximo de 60 unidades.

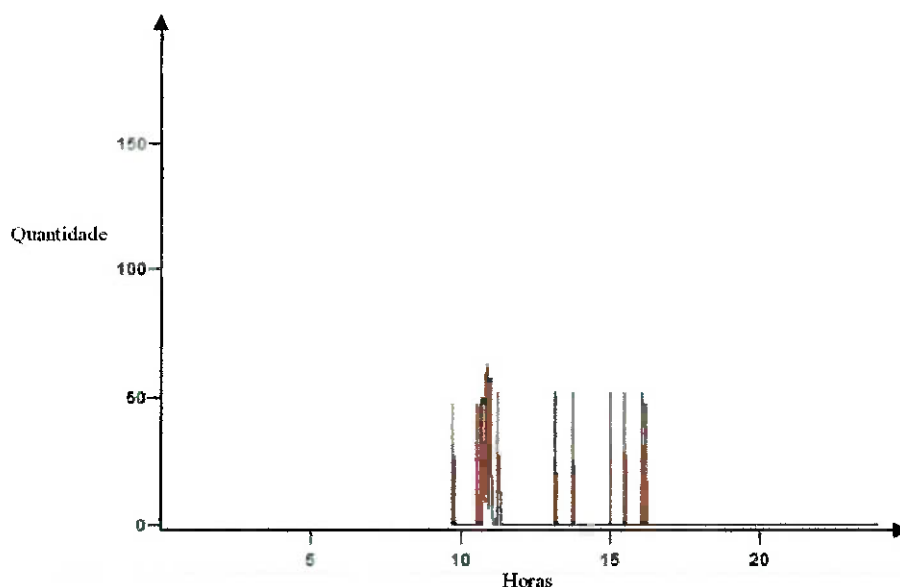


Figura 5.2 - Fila de colocação do código de barras. Modelo do ProModel.

O perfil desta fila apresenta algumas diferenças em relação ao perfil apresentado no trabalho de COUCHMAN; JONES; GRIFFITHS (2002). Estas se devem a detalhes do fluxo não especificados do modelo de SIMUL8, pois perfil resultante do modelo em ProModel é coerente com o que se esperaria a partir da descrição feita do fluxo nesse

trabalho.

5.1.2. *Fila do banco de dados*

O perfil da fila de dados dos exames das amostras a serem introduzidos no banco de dados (Figura 5.3) também apresenta picos com cerca de 40 amostras cada. A variação observada entre os perfis das filas de colocação do código de barras causa uma distorção entre os perfis das filas do banco de dados.

O perfil da fila observada no ProModel possui uma deformação condizente com a variação anterior, pois, devido à concentração do perfil de picos na colocação de código de barras em torno das 11 horas, criou-se um pico maior no banco de dados cerca de meia hora depois. Este pico, além de maior que os outros (cerca de 60 unidades) também é mais largo. Isso ocorre porque, enquanto as amostras chegam em uma relativamente alta frequência (até as 11:45 h), existe um aumento constante de elementos na fila, mas uma vez que a frequência de entrada decresce a fila é rapidamente eliminada.

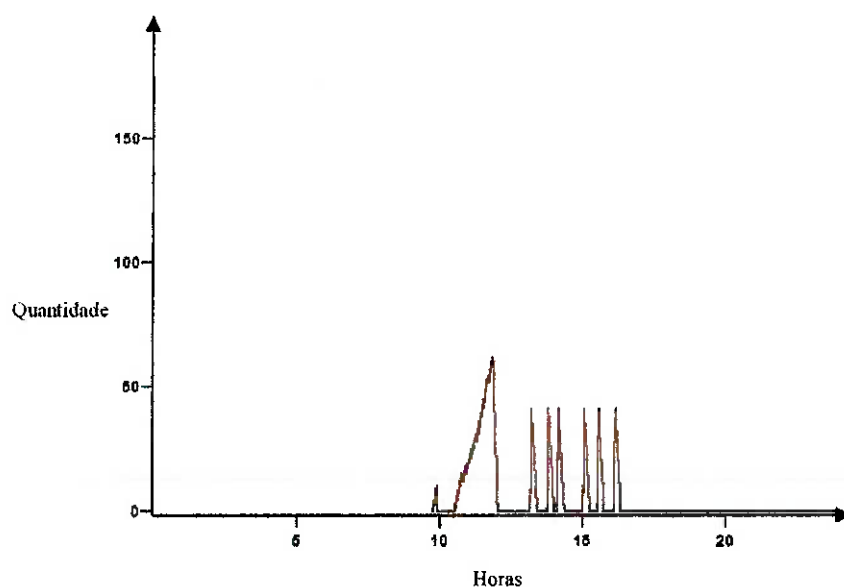


Figura 5.3 – Fila do banco de dados. Modelo do ProModel.

As diferenças em relação ao perfil da mesma curva do modelo de SIMUL8 são condizentes com as variações observadas no entre os perfis da fila de colocação de

código de barras.

5.1.3. *Fila dos testes de rotina*

O perfil da fila do segundo analisador de testes de rotina (Figura 5.4) apresenta dois picos separados: um menor em torno das 12:00 h (de aproximadamente 40 unidades) e outro em torno das 16:00 h (de aproximadamente 80 unidades). O perfil da fila também indica que a fila não existe mais após as 20:00 h.

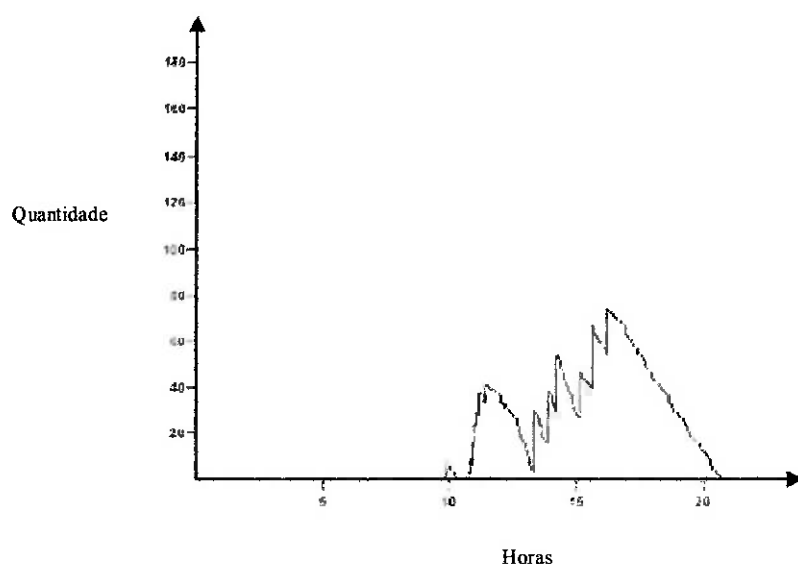


Figura 5.4 – Fila do teste de rotina. Modelo do ProModel.

Este perfil resultante se assemelha ao perfil da fila do modelo de SIMUL8. Pode-se notar a existência de dois picos nos dois casos e seus pontos máximos são próximos. Uma diferença notável é a falta de um acúmulo de amostras após as 20 horas, que existe no modelo de SIMUL8 e não existe no modelo de ProModel.

5.1.4. Fila da validação dos testes de rotina

O perfil da fila da validação dos testes de rotina (Figura 5.5) indica uma ascensão constante a partir das 11 horas com picos em torno de 85 unidades. O pico é completamente eliminado pouco depois das 19:00 h.

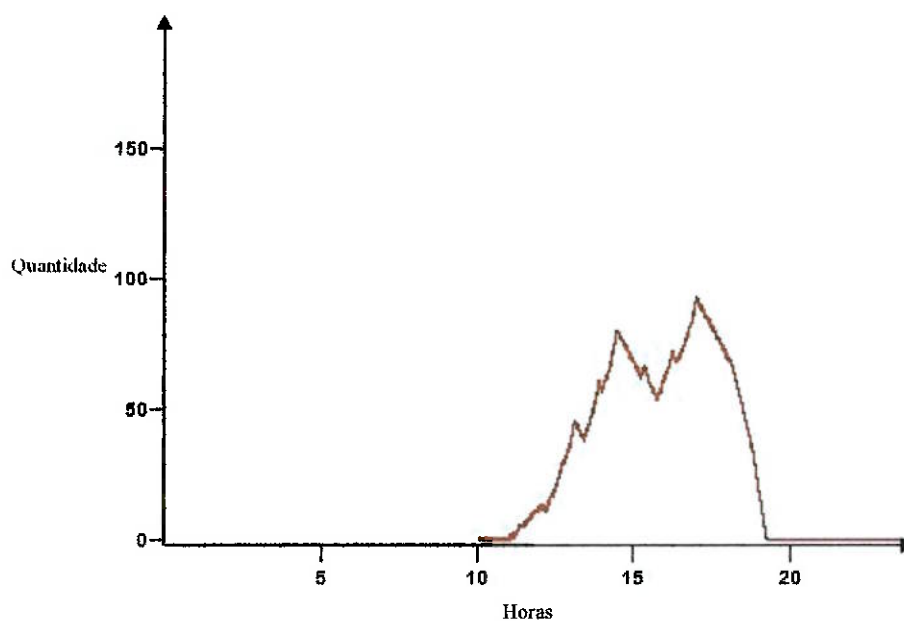


Figura 5.5 – Fila de validação do teste de rotina. Modelo do ProModel.

Em comparação com o perfil da mesma fila no modelo de SIMUL8, pode-se notar a diferença entre os valores máximos dos picos. No modelo de ProModel encontrou-se um perfil com um primeiro pico maior e um segundo pico menor. No modelo em SIMUL8 o primeiro pico é pequeno (cerca de 40 amostras) e o segundo bem maior (cerca de 110 amostras).

6. Comentários Finais e Conclusões

Buscou-se neste trabalho explorar as características da RdP, e suas expressões como o PFS/MFG, na modelagem e análise de um sistema usando também as facilidades do “pacote” de simulação ProModel.

Para este estudo foi considerado um sistema real cujos dados de desempenho estavam disponibilizados e, desta forma, poderiam ser objeto de estudo de caso, permitindo a construção dos modelos para análise em diferentes técnicas, a validação e a comparação entre elas.

No caso da RdP, a base teórica permite a adoção de técnicas e ferramentas genéricas de análise e síntese de modelos de sistemas. A RdP possui um alto poder de descrição de sistemas, tornando fácil a visualização das estruturas dos sistemas e da dinâmica envolvida, no entanto, ela requer maior capacidade de abstração por parte do modelador ou analisador envolvido para interpretar e processar os dados resultantes.

Os “pacotes” de simulação, por sua vez, têm sido desenvolvidos desde o início com uma interface voltada à compreensão e manipulação dos dados gerados para certos tipos de sistemas. Nestes “pacotes” deve-se determinar, passo a passo, quando um evento implica no processamento de uma lógica ou no acionamento de outros eventos. Neste contexto, aqui foi utilizado o ProModel, que é um “pacote” de simulação de sistemas de manufatura, adaptável a sistemas de saúde como o do estudo de caso, através da determinação das relações entre os elementos que afetam o fluxo e as entidades constituintes do modelo.

No modelo desenvolvido em RdP foi adotada a metodologia PFS/MFG para sua elaboração. Desta forma, foi obtida uma base para a análise qualitativa do sistema e posterior modelagem no ProModel. Com a obtenção do PFS e do detalhamento (MFG), sistematizou-se a forma como o sistema pode ser introduzido e estudado no ProModel. Isto se deu na transformação direta das atividades em PFS nos “locais” do ProModel e na composição das lógicas e processos baseados no detalhamento do MFG (Figura 6.1).

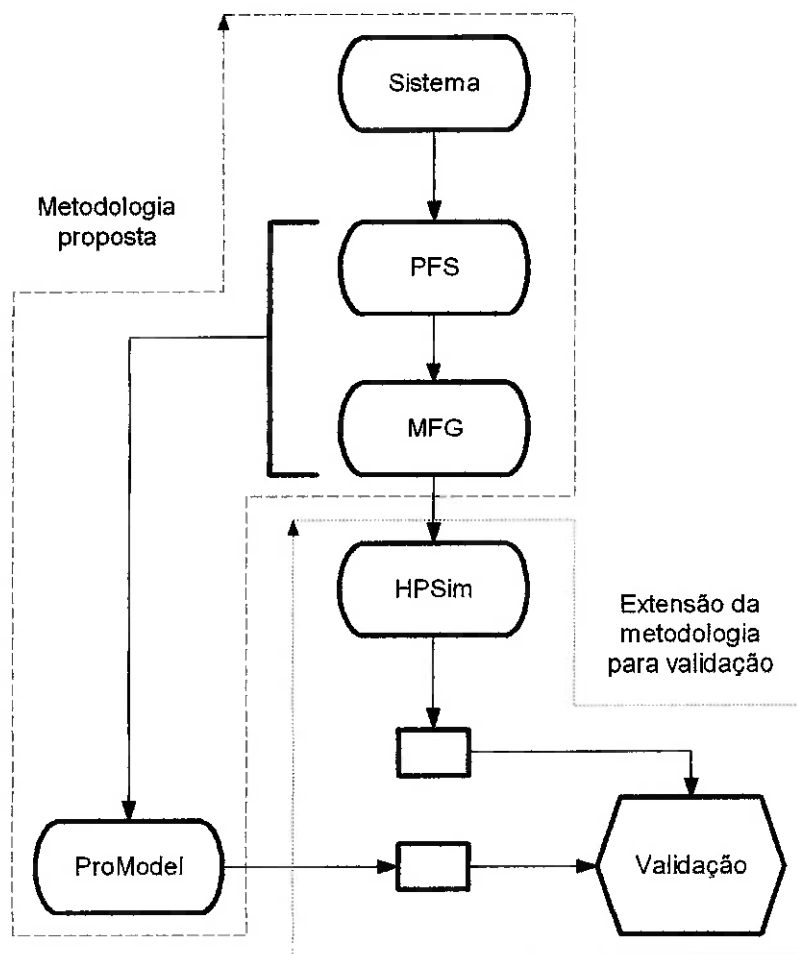


Figura 6.1 - Procedimento adotado no projeto.

O procedimento desenvolvido para a modelagem de sistemas complexos utilizando RdP e “pacotes” de simulação consiste dos seguintes passos:

- Entendimento das características do sistema a ser modelado;
- Elaboração da modelagem conceitual (PFS);
- Modelagem funcional / detalhamento das atividades do PFS (MFG);
- Análise qualitativa (HPSim);
- Conversão do PFS/MFG para definir o sistema no ProModel;
- Análise quantitativa.

Concluiu-se que com o uso do procedimento citado pode-se realizar uma

validação do escopo do projeto de simulação anterior à construção do modelo detalhado no simulador. Isso evita o procedimento, comum em projetos de simulação, de procura de novos dados ou processos, diminuindo a necessidade de revisões posteriores do modelo e das regras do sistema.

7. Referências Bibliográficas

HARREL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using ProModel**. Orem, McGraw-Hill, 2000.

BATEMAN, R. E. et al. **System Improvement Using Simulation**. Utah, PROMODEL CORPORATION, 1997.

SHANNON, R. E. **Systems Simulation: The Art and Science**. Prentice-Hall, 1975.

GORDON, G. **System Simulation**, 2nd ed. Prentice-Hall, 1978.

DA SILVA, E. M. et al. **Pesquisa Operacional**. São Paulo, Atlas, 1995.

HARREL, C. R.; MOTT, J.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação. Otimizando sistemas**. Instituto IMAN, 2002.

PROMODEL CORPORATION. **ProModel User's Guide** (2002).

Manual HPSim, 22/01/2002.

GLENNEY, N. E.; MACKULAK, G. T. **Modeling & Simulation Provide Key to CIM Implementation Philosophy**. *Industrial Engineering*, 1985.

URBAN, C.; SIBBEL, R. **Agent-Based Modeling and Simulation for Hospital Management**. [paper]

MIYAGI, PAULO EIGI. **Controle Programável**. Ed. Edgard Blücher LTDA. 2001.

BASTIDAS, GLADYS DEIFAN. **Aplicação de Redes de Petri Interpretadas na Modelagem de Sistemas de Elevadores em Edifícios Inteligentes**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de Engenharia. 1999.

MATSUSAKI, CRISTINA MOTOHASHI TOSHIE, **Redes F-MFG (Functional Mark Flow Graph) e sua Aplicação no Projeto de Sistemas Antropocêntricos**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de Engenharia. 1998.

CASSANDRAS, C.G.: RAMADGE, P.J. **Towards a Control Theory for Discrete Event Systems**. IEEE Control Systems Magazine, IEEE, v.10, n.4, p.66-68, 1990.

HO, Y.C. **Dynamics of Discrete Event Systems**. Proceedings of IEEE, IEEE v.77, n.1, p.3-6, 1989.

COUCHMAN A., JONES D.I., GRIFFITHS K.D. **Predicting the Future Performance of a Clinical Biochemistry Laboratory by Computer Simulation**, University of Wales. 2002.