



Universidade de Pernambuco
Escola Politécnica de Pernambuco
Departamento de Sistemas e Computação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação

César Augusto Lins de Oliveira

**Uma Abordagem para Melhoria de Workflow
Baseada em Redes de Petri Estocásticas
Generalizadas**

Dissertação de Mestrado

Recife, 30 de maio de 2008

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

CÉSAR AUGUSTO LINS DE OLIVEIRA

**Uma Abordagem para Melhoria de
Workflow Baseada em Redes de Petri
Estocásticas Generalizadas**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Computação

Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima
Orientador

Recife, 30 de maio de 2008

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

César Augusto Lins de Oliveira,

Uma Abordagem para Melhoria de Workflow Baseada em
Redes de Petri Estocásticas Generalizadas /

César Augusto Lins de Oliveira. – Recife: PPGEC
da UPE, 2008.

118 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Pernambuco.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação,
Recife, BR-PE, 2008. Orientador: Ricardo Massa Ferreira
Lima.

1. Workflow. 2. Melhoria de processos de negócio. 3. Mod-
elos estocásticos. 4. Análise de desempenho. 5. Redes de Petri
estocásticas generalizadas. I. Lima, Ricardo Massa Ferreira.
II. Título.

*You will remember the beginning of humankind.
Our first parents were quick to get themselves into trouble.
They were expelled from the garden of Eden.
I understand that Adam took Eve's hand,
and said: "My dear, we are living in a time of transition".*

— STAFFORD BEER
1992, *World in Torment*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por mais esta realização, por me permitir alcançar todos os meus objetivos e me dar forças para buscar cada vez mais.

Obrigado aos meus pais, que me deram tudo para que pudesse realizar tudo aquilo que eu escolhi e a meu irmão por seu apoio e companhia permanentes.

Obrigado a todos os meus colegas desta que foi a primeira turma de mestrado do Departamento. Enfrentamos juntos problemas e dificuldades que nos fortaleceram como profissionais e como pessoas. Obrigado a meu amigo, colega de graduação, Petrônio Braga, sempre companheiro em todos os momentos passados, presentes e futuros. A Henrique Mostaert, irmão por parte de orientador, que participou junto comigo de muitas aventuras e momentos cômicos ao longo deste mestrado. A Marcelo, Mário e Alexandre, pela divertida companhia e discussões sobre o mercado financeiro. Muito obrigado a Danilo e Renata, pelas conversas, caronas, almoços e outros muitos momentos divertidos que passamos juntos. A Ellen por sua agradável companhia e disposição por ajudar no que lhe estivesse ao alcance. A todos os outros, Diogo, George, Wesnaida, Renata, Lilian, Thyago, Bernardo e Anthony, por todos os momentos em que buscamos unidos por nossos objetivos.

Muito obrigado a Ana Georgina, melhor secretária do Departamento, pela prestabilidade, carinho e competência durante todo o tempo.

Obrigado aos professores que lutam diariamente pelo curso e seus alunos, visando sempre o melhor. Especialmente, ao meu orientador, Ricardo Massa, por me apoiar desde a graduação, sempre confiando em minha capacidade, participando e dando o incentivo necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, colegas da graduação, Cleyton e Laura, que mesmo não seguindo o mesmo caminho na pós-graduação continuam presentes e participantes em todo o percurso deste trabalho.

Obrigado também a Carolina Chiao, que forneceu materiais importantes para o desenvolvimento deste trabalho, ao Dr. Hajo Reijers, por sua disposição em auxiliar nesta pesquisa e por seus comentários valiosos, e aos membros da banca, Dr. Paulo Maciel e Dr. Adriano Lorena, pelas correções e sugestões essenciais.

Por fim, meu agradecimento ao graduando Thiago André, que participou desde o início desta pesquisa, sempre tentando dar o máximo de si para contribuir com a realização de um trabalho relevante e de qualidade.

Sumário

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	2
1.1.1 Busca por um Workflow Correto	2
1.1.2 Busca por um Workflow Eficiente	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Trabalhos Relacionados	4
1.4 Contribuições	5
1.5 Organização Deste Trabalho	5
2 EVOLUÇÃO DA VISÃO PROCESSUAL	7
2.1 Das Partes para o Todo	7
2.2 Visão Sistêmica da Organização	8
2.3 A Era do e-Business	9
2.4 Evolução do Entendimento da Empresa em Relação aos seus Processos .	11
3 GESTÃO DE PROCESSOS DE NEGÓCIO	14
3.1 Cadeias de Valor	14
3.2 Processos de Negócio	15
3.3 Arquitetura de Processos	17
3.4 Sistemas de Gestão de Processos	19
3.5 Uso Atual da Gestão por Processos	20
4 MELHORIA DE PROCESSOS DE NEGÓCIO	23
4.1 Eficiência e Efetividade de um Processo	24
4.2 Abordagens para Melhoria	25
4.3 Metodologias para Melhoria	26
4.3.1 Seis Sigma (6σ)	26
4.3.2 Produção Enxuta (Lean Manufacturing)	27
4.4 Fases de um Projeto de Melhoria	28
4.4.1 Fase 1: Planejamento	29
4.4.2 Fase 2: Modelagem e Análise	29

4.4.3	Fase 3: Redesenho/Melhoria	30
4.4.4	Fase 4: Desenvolvimento	30
4.4.5	Fase 5: Transição	31
4.5	Boas Práticas para Melhoria de Processos	31
5	MODELAGEM E ANÁLISE DE WORKFLOW	34
5.1	Propósito da Modelagem de Processos	34
5.2	Terminologia	35
5.3	Estruturas de Controle de Fluxo	38
5.3.1	Padrões de Workflow	38
5.4	Notações de Workflow	40
5.4.1	Diagrama de Atividade UML	40
5.4.2	Business Process Modeling Notation	41
5.4.3	Business Process Execution Language	41
5.4.4	XML Process Definition Language	42
5.5	Modelos Formais e Análise de Workflow	42
5.5.1	Workflow Net	43
5.5.2	Stochastic Workflow Net	45
5.5.3	Resource-Extended Stochastic Workflow Net	46
5.5.4	Time Workflow Net	46
5.5.5	Multidimension Workflow Net	47
5.5.6	Yet Another Workflow Language	47
6	UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE WORKFLOW	48
6.1	Modelos Básicos	49
6.1.1	Métricas Para os Modelos Básicos	54
6.2	Composição de Sub-processos	55
6.2.1	Seqüência	55
6.2.2	Métricas Para a Seqüência	56
6.2.3	Caminho Alternativo (XOR)	56
6.2.4	Métricas Para o Caminho Alternativo	57
6.2.5	Execução em Paralelo (AND)	58
6.2.6	Métricas Para a Execução em Paralelo	59
6.2.7	Iteração	59
6.2.8	Métricas Para a Iteração	61
6.2.9	Múltiplos Caminhos com Sincronização (OR)	63
6.2.10	Métricas Para Múltiplos Caminhos com Sincronização	65
6.2.11	Intercalamento	66
6.2.12	Métricas Para o Intercalamento	67
6.2.13	Eliminação de Sub-processos	68
6.3	Modelos Avançados de Atividade	68
6.3.1	Atividade Cancelável	68
6.3.2	Múltiplas Instâncias sem Sincronização	70
6.3.3	Múltiplas Instâncias com Conhecimento em Tempo de Projeto	71
6.3.4	Atividade com Recurso Especialista e Generalista	73
6.4	Tratamento de Exceções	75
6.4.1	Atividade Cancelada por Timeout Determinístico com Procedimento de Recuperação	75

6.5	Avaliando o Modelo	76
6.5.1	Propriedade <i>Soundness</i>	76
6.5.2	Avaliação de Desempenho	78
7	UMA METODOLOGIA PARA MELHORIA DE PROCESSOS	79
7.1	Fase 1: Definição de Metas para o Processo	79
7.2	Fase 2: Seleção de Métricas	80
7.3	Fase 3: Modelagem e Avaliação do Workflow	81
7.4	Fase 4: Analisando os Resultados	83
7.5	Fase 5: Realizando Mudanças	84
8	ESTUDOS DE CASO	86
8.1	Estudo de Caso 1: Indústria de Coberturas Metálicas	86
8.2	Aplicação da Metodologia	88
8.2.1	Fase 1: Definição de Metas para o Processo	88
8.2.2	Fase 2: Seleção de Métricas	88
8.2.3	Fase 3: Modelagem e Avaliação do Workflow	88
8.2.4	Fase 4: Analisando os Resultados	90
8.2.5	Fase 5: Realizando Mudanças	92
8.3	Estudo de Caso 2: Especialistas e Generalistas	94
8.4	Conclusões	98
9	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
9.1	Trabalhos Futuros	101
A	EMBASAMENTO MATEMÁTICO	103
A.1	Teoria da Probabilidade	103
A.1.1	Definições	103
A.1.2	Outras Definições e Axiomas	104
A.2	Variáveis Aleatórias e Distribuições de Probabilidade	105
A.3	Processos Estocásticos	106
A.4	Cadeias de Markov	107
A.5	Teoria das Filas	108
A.6	Redes de Petri	110
A.7	Outros Tipos de Redes de Petri	112
A.8	Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN)	112
A.9	Análise da GSPN	113
	REFERÊNCIAS	115

Lista de Abreviaturas e Siglas

BPI	Business Process Improvement (Melhoria de Processos de Negócio)
BPEL	Business Process Execution Language
BPM	Business Process Management (Gestão de Processos de Negócio)
BPMN	Business Process Modeling Notation
BPMM	Business Process Maturity Model
BPMS	Business Process Management System (Sistema de Gestão de Processos de Negócio)
BPR	Business Process Redesign (Redesenho de Processos de Negócio)
CEO	Chief Executive Officer
CIO	Chief Information Officer
CMM	Capability Maturity Model
CMMI	Capability Maturity Model Integration
ERP	Enterprise Resource Planning
GSPN	Generalized Stochastic Petri Net (Rede de Petri Estocástica Generalizada)
MWF-Net	Multidimension Workflow Net
OMG	Object Management Group
PMBok	Project Management Body of Knowledge
SEI	Software Engineering Institute
SOA	Service-Oriented Architecture
SWN	Stochastic Workflow Net
TI	Tecnologia da Informação
TPS	Toyota Production System (Sistema Toyota de Produção)
TQM	Total Quality Management (Gestão Pela Qualidade Total)
TWF-Net	Time Workflow Net
UML	Unified Modeling Language
XML	eXtensible Markup Language
XPDL	XML Process Definition Language

WfMC	Workflow Management Coalition
WfMS	Workflow Management System
WF-Net	Workflow Net
YAWL	Yet Another Workflow Language

Lista de Figuras

Figura 2.1: Empresa como Sistema	9
Figura 3.1: Cadeia de valor genérica apresentada por Michael Porter	14
Figura 3.2: Exemplo de processo em UML	15
Figura 3.3: Funções do gerente responsável por um processo (Geary Rummler)	16
Figura 3.4: Ciclo de alinhamento da empresa (Paul Harmon)	18
Figura 3.5: Fatores que influenciam na adoção da gestão e melhoria de processos	21
Figura 3.6: Realização de documentação e alinhamento de processos	21
Figura 3.7: Utilização de métricas para acompanhar o desempenho dos processos da empresa	21
Figura 5.1: Relacionamento entre os principais elementos de um Workflow	37
Figura 5.2: Elementos Básicos do Diagrama de Atividade	41
Figura 5.3: Elementos básicos da WF-Net e sua rede de Petri equivalente	43
Figura 5.4: Exemplo de modelo WF-Net	44
Figura 5.5: Notação para representação de gatilhos	44
Figura 6.1: Modelo de Atividade em GSPN	50
Figura 6.2: Sistema de Workflow mais simples	53
Figura 6.3: Composição em seqüência (SEQ)	56
Figura 6.4: Composição de caminhos alternativos (XOR)	57
Figura 6.5: Composição em paralelo (AND)	58
Figura 6.6: Composição iterativa (LOOP)	61
Figura 6.7: Composição iterativa em grade com dois pontos de saída (GRID-LOOP)	61
Figura 6.8: Composição de múltiplos caminhos com sincronização (OR)	65
Figura 6.9: Composição de intercalamento (INTER)	67
Figura 6.10: Modelo de Atividade Cancelável	69
Figura 6.11: Atividade com Múltiplas Instâncias sem Sincronização	72
Figura 6.12: Atividade com Múltiplas Instâncias com Conhecimento em Tempo de Projeto	73
Figura 6.13: Atividade com Especialista/Generalista	74
Figura 6.14: Atividade com Timeout e Processo de Recuperação	76
Figura 6.15: Modelo de Corretude do Workflow	78
Figura 8.1: Workflow abordado no estudo de caso	87
Figura 8.2: Diagrama de composição do estudo de caso	90
Figura 8.3: Modelo em GSPN do estudo de caso	91
Figura 8.4: Workflow da empresa de software	95
Figura 8.5: Modelo GSPN do segundo estudo de caso	96

Figura 8.6: Tempos de execução e custos	97
Figura A.1: Exemplo de rede de Petri	111

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Atividades com as quais as companhias estiveram ativas em 2007	22
Tabela 4.1: Estatísticas das fábricas GM e Toyota (1986)	23
Tabela 6.1: Métricas para os modelos básicos	55
Tabela 7.1: Modelo de documento de nomenclatura	82
Tabela 7.2: Modelo de planilha de resultados	84
Tabela 8.1: Métricas do estudo de caso	88
Tabela 8.2: Histórico do estudo de caso (estimado)	89
Tabela 8.3: Nomenclatura usada no estudo de caso	89
Tabela 8.4: Taxas de chegada internas em cada Sub-processo	90
Tabela 8.5: Cálculo do número mínimo de recursos em cada papel	90
Tabela 8.6: Resultados da avaliação	92
Tabela 8.7: Matriz de influência	92
Tabela 8.8: Resultados da avaliação da versão <i>PODERIA</i>	93
Tabela 8.9: Participantes de cada Atividade	95
Tabela 8.10: Transições e delays de cada Atividade	96
Tabela 8.11: Probabilidades nas estruturas alternativas	96
Tabela 8.12: Resultados obtidos nas várias configurações	97

Resumo

A Gestão de Processos de Negócio baseada em Workflow vem se tornando um importante recurso administrativo no contexto de médias e grandes empresas. Esta abordagem consiste na automatização dos processos empresariais através da implantação de sistemas de informação especializados, que têm por objetivo otimizar o fluxo de informações dentro da organização. A peça-chave nestes sistemas é o desenho do processo da empresa que se quer automatizar, chamado de *Workflow*. Um Workflow descreve todas as atividades que são executadas no processo, define seus participantes (os responsáveis por cada atividade), os dados que são transferidos entre eles e a ordem em que tais atividades devem ocorrer.

Este trabalho tem foco na Melhoria de Workflow. Este tema aborda a busca por eficiência, produtividade e qualidade em processos de negócio. Esta tarefa deve ser realizada de forma objetiva, sistematizada e alinhada às metas estratégicas da organização.

Um grande número de pesquisas propõem o uso de redes de Petri como método de análise qualitativa e quantitativa de Workflow, com o fim de oferecer apoio a projetos de melhoria. Este formalismo é amplamente usado para verificação e análise de desempenho de sistemas variados e apresenta características que fazem a sua aplicação em Workflow bastante natural. Apesar disso, se verificou que o uso de redes de Petri neste contexto ainda apresenta limitações e não está devidamente alinhado às preocupações enfrentadas na Gestão de Processos de Negócio. Poucos modelos abordam características realistas do Workflow e muitos deles não tiram proveito do potencial das redes de Petri.

Neste trabalho, é apresentada uma metodologia para a aplicação de Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN) em projetos de melhoria de Workflow. Os conceitos de Workflow são mapeados em estruturas modeladas em GSPN, fornecendo uma representação formal para Workflow que pode ser utilizada para a realização de análises qualitativas e de desempenho.

Diversas características encontradas em processos reais são consideradas neste modelo, tais como disputa por recursos e controle de fluxo complexo entre atividades. Estas características não estão presentes em outros modelos relacionados. Além disso, a metodologia apresentada alinha este método aos conceitos e necessidades encontrados na Gestão de Processos, permitindo uma integração com o arcabouço conceitual desta área. A metodologia é utilizada na realização de dois estudos de caso que demonstram sua relevância do ponto de vista prático.

Palavras-chave: Workflow, melhoria de processos de negócio, modelos estocásticos, análise de desempenho, redes de Petri estocásticas generalizadas.

An Approach for Workflow Improvement Based on Generalized Stochastic Petri Nets

Abstract

Workflow-based Business Process Management has become an important resource for medium-sized and large enterprises. This approach consists in the automation of business processes through the use of specialized information systems. Such systems have the purpose of optimizing the information flow inside an organization. The core of these systems is the design of the process to be automated, which is called *Workflow*. A Workflow describes every activity that is executed in the process, defines its participants, the data that is transferred between them and the order in which each activity must be carried on.

This work focuses on Workflow Improvement. This subject involves the search for efficiency, productivity and quality in business process. This task must be taken objectively, systematically and in alignment with strategic goals of the organization.

Many researches propose the use of Petri nets as a method for qualitative and quantitative analysis of Workflow, with the aim of supporting improvement projects. This formalism is widely used for system verification and performance analysis in a variety of fields. Its characteristics make it naturally applicable for Workflow modeling. Nevertheless, it was observed that the use of Petri nets in this context still presents limitations and is not well aligned with concerns faced by Business Process Management. Few models approach Workflow realistically and many of them miss to take advantage of the potentiality of Petri nets.

In this work, it is presented a methodology for applying Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN) in Workflow improvement projects. Workflow concepts are mapped to structures modeled with GSPN. This provides a formal representation for Workflow that can be used to make qualitative and performance analysis.

Several characteristics found in real processes are taken into consideration, such as resource dispute and complex flow-control between activities. These characteristics are not present in related models. Furthermore, the methodology proposed aligns this method with concepts and concerns of BPM, which allows a natural integration with the conceptual background of this field. The methodology is applied in two case studies, which demonstrate its relevance in a practical perspective.

Keywords: workflow, business process improvement, stochastic models, performance analysis, generalized stochastic Petri nets.

Capítulo 1

Introdução

A Melhoria de Workflow é um tópico em meio a uma vasta área do conhecimento, que se chama *Gestão de Processos de Negócio (Business Process Management)*, ou BPM. Inicialmente, pode-se pensar que é um tema específico da ciência da Administração de Empresas, mas termos como *processos* e *Workflow* levantam a suspeita de que há algum relacionamento com a Ciência da Computação, embora qual seja esta relação não se faça evidente.

Na verdade, pode-se incluir em BPM um grande número de ramos da ciência, tais como a Psicologia, Sociologia, Estatística, Tecnologia da Informação e Comunicação, Administração e *Marketing*. Todos estes possuem papel importante na resolução de problemas que envolvem a Gestão de Processos.

Os avanços tecnológicos e a popularização da informática e da Internet transformaram a Tecnologia da Informação (TI) em um dos pilares da administração moderna. Os sistemas de informação ocupam todas as áreas da empresa e passaram a constituir o seu sistema nervoso, sem o qual nada mais pode funcionar. Por essa razão, a Gestão de Processos de Negócio tem sido o foco de inúmeras pesquisas na área da computação.

Dentre as preocupações presentes em BPM, pode-se distinguir duas perspectivas para as quais a TI é aplicada:

- **operacional:** a Tecnologia da Informação é utilizada como ferramenta de apoio às operações da empresa, na realização das atividades básicas que garantem o seu funcionamento;
- **gerencial:** a Tecnologia da Informação é utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisões. Ela fornece meios através dos quais o gerente pode estudar, planejar e controlar o funcionamento da empresa.

Para que se torne mais claro como estas tarefas são abordadas pela computação, é necessário que se entenda o conceito de *processos de negócios*.

Um processo de negócio é uma visão funcional da empresa. Ao invés de estar preocupada com **o quê** a empresa faz, esta visão preocupa-se com **como** ela funciona. *O processo descreve o conjunto de atividades que são realizadas para a produção do serviço ou produto oferecido pela empresa.*

Um Workflow, por sua vez, é uma representação do processo de tal forma que a coordenação entre atividades, participantes e aplicações é realizada por um sistema de informação, conhecido por *Sistema de Gestão de Workflow (Workflow Management System)* ou *Sistema de Gestão de Processos de Negócio (Business Process*

Management System) [zur02]. Através do Workflow, um processo é automatizado, de forma a fornecer apoio tanto no nível operacional quanto no nível gerencial.

A Melhoria de Workflow, uma das preocupações da *Melhoria de Processos de Negócio* (*Business Process Improvement*), ou BPI, tem o objetivo de realizar mudanças no processo de forma a se reduzir os custos de sua execução e aumentar a qualidade de seus produtos. Um processo mais eficiente fornece maior lucratividade para a empresa.

Este trabalho aborda o tema da Melhoria de Workflow sob o ponto de vista da Análise de Desempenho, aplicando neste cenário um método matemático conhecido por *Redes de Petri Estocásticas Generalizadas* (*Generalized Stochastic Petri Nets*) [MBea95], ou GSPN. Este método é amplamente estabelecido para a análise de desempenho de sistemas variados, incluindo sistemas de manufatura. Uma abordagem para o uso de GSPN na modelagem de Workflow é apresentada por A. Ferscha [Fer94]. Seu modelo, entretanto, não está atualizado com os conceitos que se estabeleceram na década de 90, de maneira que se torna difícil fazer um mapeamento com o cenário atual.

1.1 Motivação

A melhoria de processos é a chave para a obtenção de vantagem competitiva no mercado. Grandes empresas, tais como a japonesa *Toyota Motor Corporation*, são líderes no seu mercado por manterem uma política de melhoria contínua de processos. Isto permite que elas possam produzir com maior eficiência e qualidade que seus concorrentes, aumentando sua margem de lucro e permitindo a prática de preços mais baixos e mais competitivos.

Workflow é uma das metodologias mais comuns para automação e gestão de processos de negócio em todo o mundo. Esta abordagem consiste em manter modelos dos processos e fornecê-los a um Sistema de Gestão de Workflow, que é capaz de entendê-los, executá-los e monitorá-los.

1.1.1 Busca por um Workflow Correto

Para que um modelo de Workflow possa ser utilizado, é necessário que se tenha certeza de que seu funcionamento lógico está de acordo com o que foi projetado. As notações comumente utilizadas para representação de Workflow não possuem semântica formal definida, o que não permite que este tipo de análise lógica seja realizada. As redes de Petri [Pet62], por outro lado, são um formalismo amplamente aplicado na verificação de corretude de sistemas. Diversas pesquisas demonstram a utilização de redes de Petri como método de análise de Workflow [AH02, AH03, LS00], sendo atualmente uma abordagem bem estabelecida para este tipo de verificação.

1.1.2 Busca por um Workflow Eficiente

Uma preocupação também é dada ao aspecto da eficiência do processo. Evitar desperdícios e operações mal projetadas é essencial para se conseguir um processo eficiente e assegurar uma maior margem de lucro. Nesta questão, diversos fatores podem ter influência, tais como:

- dependências entre as atividades;
- alocação dos recursos para cada função na empresa;
- tomada de decisões operacionais em tempo hábil;
- utilização de recursos físicos;
- transporte de documentos e produtos ao longo da organização.

Uma vez que um processo tenha sido definido, é preciso estudá-lo a fim de se encontrar problemas relacionados a estas e outras questões, incluindo a detecção de gargalos no sistema e outras tarefas típicas da análise de desempenho.

Como apoio a este tipo de estudo é comum a utilização de ferramentas de simulação de processos, que permitem ao usuário observar o provável comportamento do sistema quando em execução.

Também existem pesquisas na utilização de redes de Petri na avaliação de desempenho de Workflow. Entretanto, não se observa uma metodologia para aplicação desta técnica no cenário encontrado em BPM na prática. Poucos trabalhos apresentam um mapeamento completo dos conceitos de Workflow nas redes de Petri. Além disso, existe a necessidade da utilização de técnicas auxiliares, como teoria das filas em alguns casos, para se obter parte dos resultados.

A dificuldade imposta por estas técnicas e, principalmente, a falta de uma correspondência mais clara entre estes modelos e o cenário encontrado nas empresas faz com que elas acabem por nunca alcançar uma boa utilização prática. Isto não ocorre, por exemplo, com outras abordagens matemáticas que são amplamente difundidas no meio empresarial, tais como a *Seis Sigma* [Pzy03]. A Seis Sigma envolve a utilização de métodos estatísticos para a melhoria de processos. Apesar de ter bases puramente matemáticas, assim como as redes de Petri, ela é definida por uma metodologia alinhada às preocupações atuais em BPM, o que faz a sua utilização mais popular neste contexto.

As redes de Petri, em particular as redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN), apresentam diversas características interessantes para a avaliação de desempenho de Workflow, mas poucos trabalhos tiram proveito de todo o potencial desta técnica na criação de um modelo que possa ser mais fiel à prática.

Estes problemas motivaram a concepção deste trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a criação de uma metodologia para melhoria do Workflow utilizando modelos em redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN).

Pode-se dividir este objetivo em duas partes:

1. criação de modelos em GSPN para representação dos conceitos de Workflow;
2. definição de uma metodologia de aplicação do modelo em acordo com as necessidades e preocupações da Gestão de Processos de Negócio.

Os modelos propostos neste trabalho podem ser utilizados tanto para análise qualitativa (corretude lógica) do Workflow, quanto para avaliação de desempenho. Além disso, não é necessária a combinação de GSPN com outras técnicas para obtenção dos resultados.

1.3 Trabalhos Relacionados

Redes de Petri têm sido aplicadas com sucesso para a modelagem e análise de processos de negócio há vários anos.

Para análise qualitativa, existe o modelo WF-Net (Workflow-Net), proposto por van der Aalst [Aal98, AH02], que apresenta estruturas de atividades e controle de fluxo básicas para representação de Workflow. Estas são mapeadas em modelos em redes de Petri para permitir sua análise. Van der Aalst também apresenta uma definição para a corretude do Workflow, a qual chama de propriedade *Soundness*. O modelo que propomos neste trabalho permite realizar as mesmas análises presentes na WF-Net.

O mesmo autor propôs, mais recentemente, um modelo conhecido como YAWL (*Yet Another Workflow Language*) [AH03], que é fruto de uma pesquisa em que ele e colegas identificaram um conjunto de padrões complexos de controle de fluxo encontrados em Workflows reais. Estes padrões não são diretamente representáveis por outras linguagens, inclusive redes de Petri. A linguagem YAWL foi proposta para preencher esta lacuna, permitindo analisar qualitativamente estes padrões. O modelo apresentado aqui considera também alguns destes padrões e permite, além da análise qualitativa, a análise de desempenho destas estruturas.

Outro modelo de análise qualitativa, desta vez considerando restrições de tempo, é a TWF-Net (*Time Workflow-Net*) de Ling e Schmidt [LS00]. Esta rede adiciona restrições de tempo ao modelo de van der Aalst para possibilitar análises temporais de Workflow, como garantir que *deadlines* são cumpridos. Esta característica não é abordada pelo nosso modelo.

Para análise de desempenho, Reijers propõe um modelo chamado SWNet (*Stochastic Workflow Net*) [Rei02], em que variáveis aleatórias discretas são utilizadas para representar tempos de execução de atividades. Este modelo permite a utilização de distribuições de probabilidade gerais para estes tempos e permite calcular uma variável resultante que determina o tempo de execução do Workflow. Seu modelo é uma variante das redes de Petri estocásticas. A SWNet não representa disputa por recursos. O modelo que propomos associa tempo a variáveis aleatórias exponenciais apenas, mas é possível adaptá-lo de maneira a permitir a representação de distribuições gerais. Além disso, restrições de recursos são representadas. Por outro lado, não fornecemos uma técnica para a obtenção das distribuições de probabilidade para estruturas compostas.

Enquanto a SWNet não representa recursos, um outro modelo proposto por Reijers, chamado *Resource-Extended SWNet* [Rei02], adiciona esta capacidade, mas as regras para o cálculo das distribuições de probabilidade não são mais válidas para esta extensão. Os resultados são obtidos a partir de simulações. Nesta rede, recursos não são compartilhados entre diferentes atividades. O modelo proposto no nosso trabalho permite a representação de recursos limitados e compartilhados entre atividades, oferecendo resultados também através de simulação.

Outros modelos permitem a associação de tempos e recursos através da combinação de técnicas e algoritmos auxiliares. O modelo MWF-Net (*Multidimension Workflow Net*), proposto por JianQiang [LFZ04a] tem essa característica. O modelo que propomos não necessita de outras técnicas, sendo baseado unicamente nas GSPN.

Estes trabalhos serão melhor detalhados no Cap. 5.

1.4 Contribuições

Uma das preocupações neste trabalho foi tornar a GSPN – um método formal que envolve processos estocásticos e que apresenta um certo grau de complexidade – verdadeiramente aplicável no cenário da Gestão de Processos de Negócio. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia clara e em total acordo com os conceitos, preocupações e necessidades encontrados no estado da arte deste tema.

Este trabalho é, portanto, também uma ponte entre o mundo dos negócios e o conhecimento acadêmico que constitui a avaliação de desempenho. Além disso, algumas características na análise de Workflow que não haviam ainda sido abordadas por outras técnicas relacionadas são levadas em consideração, trazendo contribuições para as pesquisas nesta área.

Pode-se ressaltar as seguintes contribuições deste trabalho:

- proposta de um modelo para avaliação qualitativa e quantitativa de Workflow utilizando GSPN, sem necessidade do complemento de outras técnicas;
- consideração de restrições de recurso que não haviam sido abordadas ainda em trabalhos relacionados;
- apresentação de modelos para padrões complexos de controle de fluxo;
- apresentação de fórmulas analíticas para algumas métricas importantes, tais como a quantidade mínima de recursos necessários no sistema;
- definição de uma metodologia para aplicação do modelo no contexto da Gestão de Processos de Negócio.

1.5 Organização Deste Trabalho

Este trabalho é organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2, descrevemos a evolução da visão das organizações em termos de processos ao longo da história. Também apresentamos qual o caminho que pode ser percorrido por uma organização para alcançar uma maturidade no entendimento de seus processos, através de uma breve apresentação do modelo de maturidade BPMM (*Business Process Maturity Model*).

No Capítulo 3, descrevemos os conceitos e práticas que caracterizam a Gestão de Processos de Negócio. Ao final, são apresentados os resultados de um *survey* que avalia o cenário atual de BPM no mundo.

No Capítulo 4, abordamos o tema da Melhoria de Processos de Negócio. Os principais conceitos e metodologias são discutidos.

No Capítulo 5 é feito um levantamento da terminologia e notações utilizados na representação de Workflow. Os principais trabalhos relacionados em modelagem e análise de Workflow são descritos.

No Capítulo 6, apresentamos nossa abordagem para modelagem e análise de Workflow utilizando GSPN. São descritos modelos básicos, regras de composição, cálculo de métricas e métodos para análise qualitativa e quantitativa do modelo.

No Capítulo 7, definimos uma metodologia para a utilização do modelo proposto na realização de projetos de Melhoria de Processos de Negócio.

No Capítulo 8, aplicamos a metodologia na realização de dois estudos de caso, em que processo reais são estudados com vistas a propor melhorias para se atingir metas estabelecidas para as empresas em questão.

No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões deste trabalho e os planos para futuros avanços no tema de pesquisa dessa dissertação.

O Apêndice A traz uma revisão das teorias e conceitos matemáticos necessários para o total entendimento do conteúdo do trabalho, incluindo os conceitos de processos estocásticos e teoria das redes de Petri. O leitor não habituado a este tema deverá remeter-se a este apêndice antes de prosseguir nos Capítulos 5 e 6 pois, de outra forma, poderá ter dificuldades com o conteúdo que é apresentado.

Capítulo 2

Evolução da Visão Processual

Este capítulo apresenta a evolução da visão processual no cenário industrial, destacando os principais pontos que conduziram ao surgimento dos conceitos e práticas da Gestão de Processos de Negócio.

2.1 Das Partes para o Todo

Durante o século XX, a ciência passou por uma evolução na sua forma de pensar que atingiu independentemente a maioria dos diferentes ramos do conhecimento. Desde biologia, física, matemática, até a psicologia e a administração. Esta evolução foi a mudança do pensamento reducionista – que divide um problema em partes menores para entendê-lo – para o pensamento holístico – que se caracteriza por abordar o todo como uma unidade indivisível [Cap03].

Esta mudança teve início nas ciências biológicas. Quanto mais os biólogos estudavam a vida, mais complicadas se tornavam as interações entre seus diversos constituintes. Percebeu-se que era impossível entender como um organismo se comporta sem observar todo o seu ambiente e as relações que mantém com este [Ash70, Cap03].

Semelhante mudança ocorreu na física, com o surgimento da física quântica. Anteriormente, os físicos acreditavam que, quanto mais conhecessem as partículas constituintes da matéria, mais próximos estariam de entender todo o universo. A física quântica mostrou que isto não era verdade. Quanto mais os físicos se aprofundavam no nível subatômico, mais percebiam que as propriedades que observavam no mundo macroscópico não estavam presentes nas pequenas partículas, mas sim surgiam das interações entre elas. Em última instância, perceberam que as partículas sequer existiam solidamente, mas eram puramente ondas de probabilidade que só podiam ser compreendidas observando-se o sistema em que estavam inseridas [Cap03, Kak00].

Ao desafiar a mente dos cientistas no início do século, essa concepção holística começou a tomar forma e se estabelecer como ciência, vindo a receber uma formulação matemática nas décadas de 30 e 40, com a *Teoria Geral dos Sistemas* de Ludwig von Bertalanffy e com a *Cibernética*, teoria multidisciplinar que deu origem às teorias do controle modernas e até mesmo à inteligência artificial [Cap03]. A Cibernética se destaca por seu objetivo ambicioso de ser capaz de lidar com sistemas excessivamente grandes e excessivamente complexos [Ash70, Bee69].

A característica-chave do pensamento sistêmico é a compreensão de que *o todo é maior do que a soma de suas partes*. As propriedades de um sistema surgem

das relações de organização que as partes apresentam entre si e não estão presentes em nenhuma delas individualmente. Desta forma, para se entender um sistema é necessário descobrir como se dão essas relações.

2.2 Visão Sistêmica da Organização

O pensamento sistêmico logo veio a atingir as ciências sociais e chegou, inevitavelmente, à Administração.

O primeiro a utilizar métodos científicos na Administração de empresas foi o engenheiro mecânico Frederick Taylor, ainda no final do século XIX. Ele é considerado por isso *o pai* da Administração Científica. Sua abordagem, dentre outras coisas, consistia em realizar medidas do comportamento da empresa e analisá-las estatisticamente. Posteriormente, seus métodos foram aprimorados por outros pesquisadores, levando à definição dos primeiros conceitos de melhoria estatística de processos [JN06].

Os métodos estatísticos para controle e melhoria evoluíram durante o século XX e levaram ao surgimento de metodologias bem estabelecidas hoje, como o *Total Quality Management* (TQM) [JN06]. Entretanto, ainda não havia até este ponto um concreto entendimento de organização como um sistema interligado. O que ocorria era que cada departamento tinha as suas próprias metodologias de melhoria e, quanto mais se especializavam no seu próprio trabalho, mais se perdia a idéia de um todo integrado [HpR03].

Na década de 60, o ciberneticista Stafford Beer resolveu aplicar as teorias da Cibernética ao gerenciamento de empresas [Bee81, Bee69]. Ele concebeu empresas como modelos de máquinas que funcionariam recebendo sinais de entrada e emitindo sinais de saída. Na sua máquina empresarial, as entradas eram as informações sobre o mercado (em forma de demanda do mercado, custos de matéria-prima, custos de transporte etc.) e sua saída eram os dados que descreviam a produção e o sucesso da empresa, tais como as informações sobre lucro, nível de produção, qualidade do produto, entre outros. Seu objetivo era representar a empresa como um organismo vivo, que precisaria ser capaz de se manter, a despeito de condições ambientais adversas [Bee69]. Beer é também conhecido por ser um dos responsáveis por levar a ciência da *pesquisa operacional*, com seu sucesso no campo militar, ao ambiente empresarial.

O trabalho de Stafford Beer pode ter chamado atenção para a visão holística na administração, mas as empresas apenas vieram a ser atingidas pela nova forma de pensar na década de 80 com o trabalho de pesquisadores como Michael E. Porter e sua concepção de estratégia competitiva e cadeias de valor [HpR03].

A concepção atual de organização como sistema assemelha-se à da máquina cibernética de Beer: uma entidade que recebe entradas, realiza alguma operação e fornece saídas. A administração moderna, entretanto, tem como base o princípio de que o propósito de uma empresa é satisfazer os seus clientes, diferentemente do propósito estipulado por Beer associado à sobrevivência. Desta forma, o elemento que o modelo de organização recebe como entrada é o pedido de um cliente e a saída resultante é o produto ou serviço que satisfaz a este pedido. Este modelo pode ser visto na Fig. 2.1.

Ao se analisar a empresa desta forma, tem-se como objetivo estudar o que acontece entre a chegada do pedido e a entrega do produto, em outras palavras, avaliar



Figura 2.1: Empresa como Sistema

o funcionamento da empresa, não sua estrutura. Um departamento passa a ser um participante, que pode atuar em diversos pontos ao longo do sistema e o que se torna o foco do interesse é qual a sua contribuição em relação ao todo.

O elemento que concretiza a visão sistêmica é o conceito de *processos*. Uma empresa é formada por diversos processos que se inter-relacionam, cada um com seu objetivo, de forma a realizarem um propósito global. Muda-se, então, da visão de um conjunto de entidades, tais como departamentos e setores, para uma visão dinâmica – processos.

O relacionamento entre os processos e sua contribuição para com o objetivo global é a grande preocupação nesta nova forma de ver a empresa. Isto se faz mais evidente quando uma decisão estratégica é tomada e uma meta é traçada para a organização. É preciso, neste momento, que mudanças sejam realizadas no funcionamento da empresa com o intuito de se alcançar aquele objetivo. A visão processual permite observar o impacto de uma mudança em parte de um processo para o restante da empresa. Por exemplo, um aumento na capacidade de produção terá impacto direto nas atividades de controle de estoque e distribuição, que são executadas posteriormente. Ao elevar a capacidade da linha de produção, pode-se causar uma sobrecarga para o restante do sistema com a qual ele não é capaz de lidar. Isto mostra o quanto o todo pode ser sensível a mudanças em suas partes. A visão sistêmica veio para tratar esta questão.

2.3 A Era do e-Business

A Internet trouxe uma grande inovação na forma como as empresas poderiam realizar a comunicação interna entre funcionários e a comunicação externa com clientes, fornecedores e parceiros. O e-mail, a *World Wide Web* e inúmeros outros protocolos trouxeram um novo poder às empresas para o qual poucas estavam preparadas.

Durante a década de 90, a explosão popular da Internet pegou a muitos de surpresa. Na ansiedade em fazerem parte da nova era que surgia, muitas empresas investiram na tecnologia sem um planejamento estratégico definido. O resultado disso foi um grande número de prejuízos.

As empresas então começaram a perceber que era necessário integrar a nova tecnologia ao conjunto de práticas administrativas que já vinham se estabelecendo ao longo dos anos e seu objetivo principal: criar melhores processos de negócio [HpR03].

A Internet e a Tecnologia da Informação deixaram de ser apenas ferramentas operacionais e se tornaram parte de todo o planejamento estratégico da organização. O termo *e-business*, segundo Paul Harmon, refere-se a qualquer uso da Internet, e-mail e Web para otimizar processos de negócio. Segundo ele, há duas abordagens distintas para o e-business [HpR03]:

- *Voltada ao Cliente* - Uma vez que os consumidores estão definitivamente utilizando e-mail e a Web em busca de informação e cada vez mais dispostos

a fazer negócios através da Internet, é necessário que a empresa tenha um planejamento para utilizar este potencial a seu favor;

- *Voltada à Integração* - A comunicação é uma questão chave dentro de uma organização, tanto para comunicação interna quanto com parceiros e fornecedores. A Internet oferece opções mais eficientes e baratas que os tradicionais telefone e fax e o uso correto desta tecnologia é extremamente favorável.

As vantagens trazidas pelo uso da Internet são inúmeras:

- *Facilidade de Acesso dos Clientes até a Empresa* - Uma vez presente na Internet através de uma página na Web, uma empresa pode ser acessada de qualquer lugar do mundo. Isto aumenta enormemente as possibilidades de negócios, desde que a empresa consiga atrair estes clientes e que tenha capacidade para satisfazer sua demanda;
- *Facilidade de Acesso da Empresa ao Cliente* - Através do e-mail, as empresas ganharam um importante aliado para a manutenção da relação com o consumidor. O e-mail vai até o cliente onde quer que ele esteja, de forma automatizada e com custos mínimos para a empresa;
- *Comunicação Eficiente entre Funcionários* - Tanto através de e-mail quanto através de mensagens instantâneas ou outros protocolos, a comunicação dentro da empresa se torna mais rápida e fácil. Um gerente pode enviar uma notificação que chega a todos os funcionários de forma instantânea como também pode receber relatórios automaticamente gerados pelo sistema assim que necessário. Filiais espalhadas em localidades distantes podem se comunicar de forma simples e econômica;
- *Comunicação Eficiente com os Fornecedores* - Com o aumento das possibilidades de vendas e do número de clientes que podem efetuar negociações com a velocidade de alguns cliques de mouse, torna-se importante que a comunicação com os fornecedores da empresa seja rápida. Por exemplo, no momento em que um cliente do outro lado do mundo faz um grande pedido, é necessário saber se a empresa comporta o pedido, se os fornecedores possuem o material necessário para que a empresa cumpra este pedido e se os distribuidores são capazes de entregá-lo a tempo. Através da Internet, toda esta comunicação pode ser feita de forma automática no instante em que o pedido é realizado pelo cliente.

Apesar de todo o potencial oferecido pela Internet, uma empresa que ainda realize a execução manual de tarefas repetitivas e seja dependente da transferência de documentos impressos, de forma burocrática, ao longo de sua estrutura, decididamente não será capaz de tirar proveito de todas estas vantagens. A automatização de processos é uma necessidade primordial na era do e-business. A integração das áreas de TI e negócios é cada vez maior no cenário comercial mundial.

O que torna um processo de negócio automatizado é a existência de um sistema de informação que esteja programado para lidar com o processo, conhecendo as seqüências de atividades a serem realizadas para cada pedido, quando elas devem ocorrer e quem deve ser avisado do que está acontecendo. Desta forma, o sistema dispensa a comunicação direta entre os funcionários, pois ele mesmo se responsabiliza

por transferir as informações entre eles e enviar notificações quando sua ação é necessária. Além disso, o sistema é capaz de realizar tarefas repetitivas e tomar decisões baseadas em regras lógicas pré-definidas.

Dentre as abordagens para automação de processos existentes, a abordagem *baseada em Workflow*, que utiliza Sistemas de Gestão de Processos para executar e monitorar os processos, é o foco deste trabalho. Este conceito será melhor discutido no Cap. 3.

2.4 Evolução do Entendimento da Empresa em Relação aos seus Processos

Ao passar dos anos, as grandes empresas estão cada vez mais conscientes em relação aos seus processos e de como devem mantê-los, de forma a obterem vantagem competitiva. Empresas que estão iniciando sua jornada na gestão de processos ainda não têm um grande controle e alinhamento dos processos com sua posição estratégica.

Para comparar o quão evoluída cada empresa é no gerenciamento de processos, foram criados os *modelos de maturidade*.

O primeiro modelo de maturidade criado foi desenvolvido pelo *Software Engineering Institute (SEI)* da *Carnegie Melon University*. O modelo, chamado de CMM (*Capability Maturity Model*) [PCCW93], foi criado para avaliar a qualidade do gerenciamento de processos em empresas de desenvolvimento de software e foi feito a pedido do Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Ele possui influências da Gestão de Qualidade Total (*Total Quality Management*), que era popular na década de 90 [HpR03].

Rapidamente, este modelo se difundiu e evoluiu para o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), que expandiu o seu campo de atuação para além da área de desenvolvimento de software. A sua versão mais atual é a *CMMI for Development version 1.2* [CMM].

O CMMI v.1.2 classifica as empresas em 5 níveis de maturidade:

1. Inicial - As empresas neste nível não oferecem um ambiente estável para a execução dos processos. Processos são executados de forma *ad-hoc* e seu sucesso depende dos esforços dos funcionários. Frequentemente o processo é abandonado em momentos de crise, prazos e orçamentos são estourados e não se consegue repetir os casos de sucesso.
2. Gerenciado - Processos são planejados e executados de acordo. A produção é controlada e avaliada em relação às especificações definidas. O processo é mantido de acordo com o planejamento, mesmo em momentos de pressão.
3. Definido - A política de processos é definida por padrões, técnicas e normas. Os processos estão estabelecidos e são consistentes em toda a organização. A especificação e os critérios de avaliação dos processos são mais rigorosos que no nível 2.
4. Gerenciado Quantitativamente - Existem métricas definidas para avaliação quantitativa do desempenho dos processos. As medidas são analisadas estatisticamente e utilizadas para tomada de decisões. Fatores que causam variações no comportamento de processos são identificadas e corrigidas.

5. Em Otimização - O desempenho dos processos é melhorado continuamente e alinhado aos objetivos da empresa.

Apesar do CMMI se aplicar a qualquer tipo de organização, os analistas de negócios observaram a necessidade de ter um modelo que melhor correspondesse à estrutura de gerenciamento de empresas na forma como era entendida pelos administradores. O modelo CMMI, provavelmente devido à sua origem em engenharia de software, é mais voltado à gerência de projetos. Um modelo de negócios, por sua vez, necessita abordar temas como alinhamento estratégico, gestão de processos e aplicação de metodologias de melhoria em processos individuais e na empresa como um todo.

Por essa razão, foi recentemente criado um modelo específico para maturidade de processos de negócio, chamado *Business Process Maturity Model* (BPMM) [CA07]. Este modelo se baseou no CMMI e foi desenvolvido com a participação de diversos de seus autores. Entretanto, seu foco foi corrigido para lidar de forma mais clara com as dificuldades encontradas pela maioria das empresas.

O BPMM descreve as práticas essenciais para a preparação, implantação, operação e apoio à oferta de produtos e serviços por parte da organização.

Os níveis de maturidade definidos pelo BPMM são também 5 [WCG07]:

1. Inicial - Processos raramente são definidos e documentados. Aqueles que são definidos raramente são seguidos. Embora os produtos ou serviços sejam entregues, dificilmente seus requisitos de custo e produtividade são atendidos. A capacidade do processo depende do esforço dos funcionários que atuam nele.
2. Gerenciado - Cada unidade de trabalho possui processos estabelecidos, executivos e gerentes fornecem liderança e coordenação para melhoria de processos, atribuem metas às unidades de trabalho e gerenciam o fluxo de atividades e dependência entre unidades de trabalho distintas. A preocupação maior é com custos, prazos e produtividade.
3. Padronizado - Uma infra-estrutura é estabelecida para promover o aprendizado organizacional e uma política de gestão de conhecimento é mantida. Os processos são definidos e mantidos de forma homogênea ao longo da organização, seguindo padrões estipulados.
4. Previsível - Metas quantitativas de desempenho e qualidade são estabelecidas e controladas. Variações no comportamento dos processos são eliminadas, tornando seus resultados previsíveis.
5. Inovando - A posição estratégica da empresa é mantida pela busca contínua de melhorias que lhe garantam produtos e serviços mais competitivos que seus concorrentes. Mudanças estratégicas são determinadas e melhorias são definidas, planejadas e implantadas de forma sistematizada.

O modelo BPMM ainda está em avaliação pela OMG (*Object Management Group*). A OMG é um organização sem fins lucrativos, responsável pela padronização de diversas tecnologias utilizadas pela indústria de software e áreas relacionadas. O propósito do BPMM, assim como do CMMI, é avaliar a capacidade gerencial possuída por uma empresa, além de indicar uma rota que pode ser seguida para se evoluir esta capacidade. Desta forma, sua preocupação está em como os processos

são gerenciados, que infra-estrutura a empresa possui para mantê-los e melhorá-los. Uma empresa que passa do Nível 2 para o Nível 3 aumentou a sua capacidade para entender e gerenciar processos. Nada impede que uma empresa de Nível 2 possua um alto grau de controle sobre um processo em particular, mas isto provavelmente será resultado de um gerente ou grupo dedicado que realizou esforços para com aquele processo. A maturidade da empresa indica que ela dominou o controle de processos e pode realizá-lo de forma sistemática em toda a empresa e que pode manter este controle ao longo dos anos, a despeito de alterações no seu quadro de funcionários e executivos.

Capítulo 3

Gestão de Processos de Negócio

Este capítulo discute conceitos, modelos, tecnologias, preocupações e tendências presentes na Gestão de Processos de Negócio.

3.1 Cadeias de Valor

O conceito de *cadeia de valor* foi definido por Michael Porter no ano de 1985, em um livro intitulado *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance* [Por85]. Trata-se de uma idéia fundamental para a mudança de pensamento que levou ao surgimento da Gestão por Processos.

O termo *valor*, conforme utilizado por Porter, refere-se a algo que o cliente é capaz de perceber no produto e pelo que está disposto a pagar. Por exemplo, se os clientes estão dispostos a pagar um preço maior por um livro porque ele possui capa dura, então pode-se dizer que este tipo de capa adiciona valor ao livro.

Uma cadeia de valor é uma perspectiva global das atividades realizadas pela empresa, que define como, a partir de uma requisição inicial do cliente, o valor do produto vai sendo incrementado até chegar à sua versão final, que é entregue ao cliente. Porter ilustra este conceito através do diagrama genérico apresentado na Fig. 3.1.



Figura 3.1: Cadeia de valor genérica apresentada por Michael Porter

O lado esquerdo do diagrama recebe o pedido de clientes. O lado direito representa sua entrega. Ao longo do diagrama, são exibidas as funções que uma empresa

desempenha entre a chegada de um pedido e a entrega do produto. O diagrama exibido na Fig. 3.1 é genérico. Apresenta apenas as funções executadas ao longo da empresa, mas não como elas são realizadas. Isto será definido pelos *processos* que compõem a cadeia de valor, como será visto a seguir. O diagrama também apresenta as atividades que precisam ser mantidas pela organização para dar apoio à execução da cadeias de valor: gestão de recursos humanos, aquisição de matéria-prima, desenvolvimento de novos produtos e serviços e manutenção da infra-estrutura.

O que um gerente precisa ter em mente ao analisar a cadeia de valor de sua empresa é o porquê de cada atividade estar sendo realizada e que valor ela está adicionando ao produto, sob a perspectiva do cliente. Este é um tema fundamental nas metodologias de melhoria de processos, conforme será apresentado no Cap. 4.

3.2 Processos de Negócio

A cadeia de valor é uma visão macroscópica de como a empresa agrega valor ao produto vendido. Para observar de forma mais detalhada o que a empresa faz, é necessário entrar mais profundamente na cadeia de valor e chegar aos processos que a compõem. O termo *processo* se refere a um conjunto de atividades que devem ser executadas em certa ordem definida para se atingir um dado objetivo dentro da cadeia de valor da organização.

Porter diferencia dois tipos de processos: primários – que incluem logística, operações, *marketing*, vendas e serviços; e de suporte – que incluem desenvolvimento tecnológico, gestão de recursos humanos, finanças, entre outros.

Em geral, uma cadeia de valor será composta por diversos processos e estes, quando muito complexos, podem ser formados por sub-processos. A Fig. 3.2 apresenta um exemplo de processo, utilizando a notação UML (*Unified Modeling Language*).

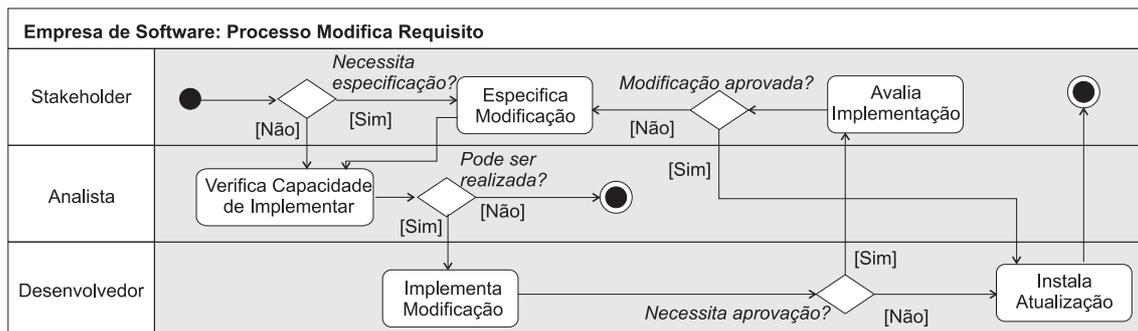


Figura 3.2: Exemplo de processo em UML

Um diagrama de processo é dividido em raias (*swimlanes*). Estas raias podem ser dispostas horizontalmente ou verticalmente. Cada raia representa um de seus participante. Em geral, a raia superior (ou da esquerda) é destinada a representar o *cliente*. O termo cliente é usado para referenciar qualquer entidade que dá início ao processo. No caso deste exemplo, trata-se de um *stakeholder* do software em desenvolvimento. O início do processo é representado por um evento (*start event*), que ocorre na raia do cliente, representado por um círculo preto. Cada atividade do processo é executada por um participante, a depender de em qual raia se encontra

desenhada aquela atividade. O final do processo é representado por um círculo branco contendo um círculo preto menor no seu centro.

A notação UML apresenta diversos outros elementos mais complexos para o desenho de processos. Além dela, existem outras notações disponíveis com este objetivo, como a BPMN (*Business Process Modeling Notation*), padronizada pela OMG (*Object Management Group*). Estas notações serão discutidas no Cap. 5.

Para uma organização, o entendimento dos seus processos é fundamental. A gestão por processos requer não apenas que os processos da empresa sejam definidos e documentados. É essencial que uma visão processual seja adotada em todos os níveis, desde o acompanhamento do desempenho de cada funcionário até o planejamento estratégico a longo prazo. Cada processo precisa ter um objetivo definido dentro da estratégia da empresa e precisa ser acompanhado, de forma que os resultados sejam verificados e ações corretivas sejam tomadas o quanto antes. Para tal, ao invés de gerentes serem atribuídos a departamentos ou setores, eles são atribuídos a processos, dos quais precisam garantir o correto funcionamento.

A Fig. 3.3 representa a definição do papel do gerente em um processo, de acordo com Geary Rummler. As duas responsabilidades principais do gerente são *Planejar* e *Controlar* o processo.

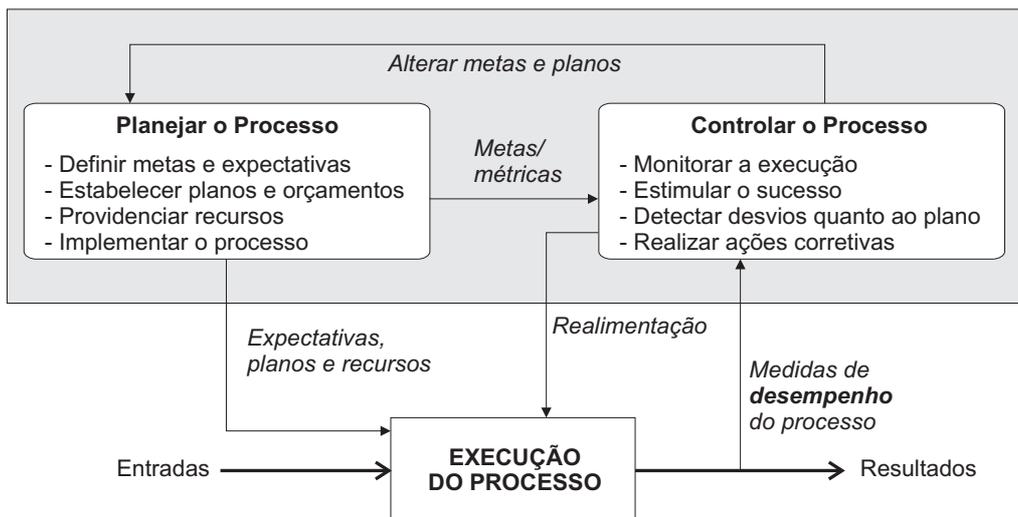


Figura 3.3: Funções do gerente responsável por um processo (Geary Rummler)

O planejamento do processo inclui não apenas definir o fluxo de atividades, mas também os seus objetivos dentro da cadeia de valor da companhia, assim como realizar a aquisição de recursos, treinamento de pessoal, e também definir como o acompanhamento do processo será realizado e que atitudes serão tomadas no caso de algum problema. A definição das atividades executadas no processo é apenas o primeiro passo.

O controle do processo, por sua vez, corresponde a acompanhar os resultados do processo de acordo com métricas definidas durante o planejamento e executar ações corretivas quando necessário.

A Gestão de Processos de Negócios (BPM – *Business Process Management*) consiste no modelo de gestão em que o entendimento da organização e a tomada de decisões é realizada com base no conceito de processos. Jeston e Nelis definem BPM como *A realização dos objetivos de uma organização através da melhoria, gestão e*

controle de processos de negócio essenciais [JN06].

Desta forma, podemos enumerar os seguintes fatores como sendo essenciais para uma gestão voltada a processos:

1. Processos definidos – Uma organização que aplica BPM possui uma cadeia de valor bem definida e suas atividades principais são expressas em termos de processos.
2. Controle no nível de processos – Cada processo possui objetivos definidos e métricas que podem ser utilizadas para avaliar o quanto esses objetivos estão sendo realizados. A responsabilidade dos gerentes é para com o correto funcionamento dos processos que lhe são atribuídos.
3. Alinhamento de processos com objetivos organizacionais – Os objetivos e metas estratégicas da organização é que definem o objetivo de cada processo. Mudanças estratégicas devem ser traduzidas em mudanças nos processos e cabe ao gerente manter continuamente este alinhamento.

A gestão por processos requer, portanto, um comprometimento da empresa como um todo, desde o nível operacional até o planejamento estratégico a longo prazo. Alguns erros comuns cometidos por empresas que não mudaram completamente para a visão processual são [JN06]:

- estrutura organizacional se baseia na visão de departamentos;
- métricas de desempenho são definidas em relação a departamentos;
- relacionamento entre os processos não é bem compreendido;
- processos e planejamento estratégico não estão alinhados;
- funcionários não entendem ou não estão comprometidos com os processos da empresa.

Harmon [HpR03] comenta que muitos empresários, se pedidos para descreverem a sua companhia, irão mencionar quais departamentos existem, quem é responsável por cada um e a quem respondem, exibindo a árvore de hierarquia da empresa. Sob esta óptica, entretanto, não está claro qual o serviço oferecido pela empresa, quem é seu cliente e o que ela faz para produzir seu produto ou serviço. A descrição das cadeias de valor da empresa e de seus processos principais, por sua vez, responde a estas perguntas e torna mais claros os fatores que levam a empresa a alcançar uma vantagem competitiva no mercado ou não.

3.3 Arquitetura de Processos

A gestão por processos requer da organização uma estrutura bem definida para a sua manutenção, de forma a garantir o alinhamento da empresa com a sua estratégia de mercado e suas metas. É necessário que a empresa possua um conjunto de processos que define como os processos são criados, monitorados e melhorados.

Paul Harmon apresenta esta questão na forma do que ele chama de ciclo de alinhamento da empresa (*enterprise alignment cycle*) [HpR03], reproduzido na Fig. 3.4.

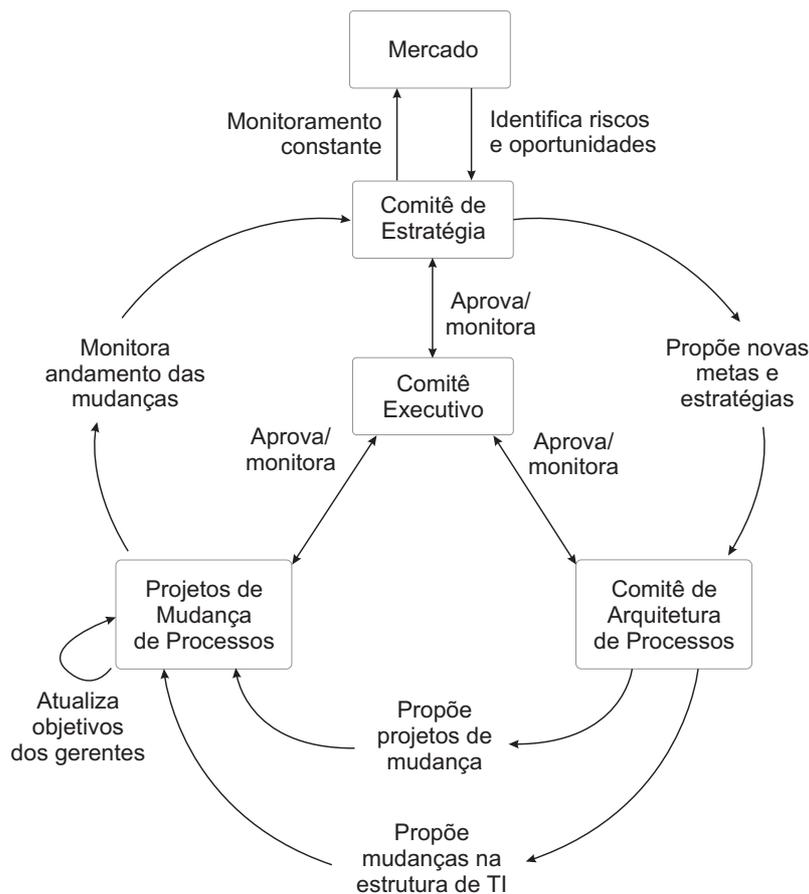


Figura 3.4: Ciclo de alinhamento da empresa (Paul Harmon)

Ele assume que uma empresa é gerenciada por um *comitê executivo* (dirigido pelo CEO - *Chief Executive Officer*), responsável pela tomada de decisões na organização. Este tem como subordinados os comitês de estratégia e de planejamento. O *comitê de estratégia* é responsável por observar o mercado e identificar ameaças e oportunidades. O *comitê de planejamento* (que ele representa pelo *comitê de arquitetura de processos*), por sua vez, é responsável por definir o que deve ser feito pela empresa em vista das ameaças e oportunidades identificadas pelo comitê de estratégia.

O comitê de planejamento, numa perspectiva voltada a processos, é o responsável por definir os objetivos globais de cada processo e que mudanças precisam ser realizadas para alcançar as novas metas delineadas para a empresa. Devido a isto, Harmon prefere usar o termo *comitê de arquitetura de processos* (*Business Process Architecture Committee*), para enfatizar a responsabilidade deste comitê para com a estrutura de manutenção dos processos da organização. Este comitê também deve ser alinhado fortemente com a gerência de Tecnologia da Informação (TI) da companhia. Por isto, um dos papéis centrais neste comitê é o do CIO (*Chief Information Officer*), responsável pela estrutura de TI da empresa. Atualmente, a figura do CIO é mais do que a de um gerente técnico. Ele é, na verdade, um elo de ligação entre negócios e tecnologia dentro da empresa, tendo em muitos casos papel fundamental no planejamento estratégico.

A Fig. 3.4 apresenta uma das possíveis formas de interação entre estes comitês sob a perspectiva de um analista de processos. O processo básico pode ser descrito da seguinte forma:

1. Ao identificar oportunidades ou ameaças no ambiente, o comitê de estratégia traça propostas que são avaliadas pelo comitê executivo.
2. Uma vez decidido que posicionamento estratégico será tomado pela companhia, as novas metas definidas são fornecidas ao comitê de arquitetura de processos. Sua responsabilidade será planejar mudanças ao longo de toda a organização com o fim de alinhar os processos com as novas metas.
3. Uma vez definidas estas mudanças e aprovadas pelo comitê executivo, são iniciados projetos de modificação de processos para efetivá-las.

Um projeto de modificação de processos é, geralmente, um grande esforço realizado cuidadosamente por uma equipe dedicada a este objetivo, conforme será apresentado no Cap. 4.

3.4 Sistemas de Gestão de Processos

A utilização de Tecnologia da Informação para a manipulação da massa de dados produzida pela organização é essencial. Este é um dos motivos pelos quais o planejamento estratégico da empresa deve estar alinhado com o planejamento de TI. Saber utilizar corretamente todos os recursos de TI disponíveis hoje em dia é um desafio enfrentado por qualquer empresa e é um fator essencial para o sucesso de uma grande organização.

Neste contexto, a automação dos processos é uma das primeiras atitudes tomadas para se melhorar o desempenho de uma organização. Processos automatizados proporcionam maior produtividade e permitem um monitoramento muito mais efetivo do andamento da empresa.

Existem três abordagens mais freqüentemente utilizadas para a automação de processos: *Workflow*; aplicações ERP (*Enterprise Resource Planning*); e desenvolvimento de softwares próprios [HpR03]. Cada uma tem suas próprias vantagens e desvantagens, de acordo com o cenário da empresa que o aplica.

- *Workflow* - Consiste em criar um modelo executável do processo, chamado de Workflow, que é executado e monitorado por um sistema de informação;
- Aplicações *Enterprise Resource Planning* - Consistem em pacotes de aplicações modulares, em que cada módulo implementa processos comumente encontrados no cenário empresarial. Estes processos pré-definidos teriam a estrutura padrão mais aplicada pelas organizações, apresentando portanto soluções consolidadas. Os diferentes módulos podem ser integrados entre si para a criação de processos complexos de acordo com as necessidades da empresa.
- Desenvolvimento de software - Consiste em utilizar os processos como requisitos para o desenvolvimento de um software próprio, otimizado para lidar com as necessidades da empresa.

Os Sistemas de Gestão de Processos (*Business Process Management Systems - BPMS*) são um conjunto de soluções para automação do gerenciamento de processos através de Workflow. São também chamados de *Workflow Management Systems - WfMS*.

Um Workflow consiste em um modelo executável de um processo. Ele define que atividades fazem parte do processo, em que ordem elas devem ser executadas, quem é o responsável por cada uma delas e que informações são transferidas de uma para a outra. Segundo a *Workflow Management Coalition* (WfMC), um consórcio de empresas dedicado à padronização dos sistemas de gestão de processos, o termo Workflow pode ser definido como *a automação de um processo de negócio, total ou parcial, na qual documentos, informações ou tarefas são passados de um participante a outro para a realização de ações*. O termo, portanto, é empregado tanto no sentido objetivo – referindo-se ao modelo executável do processo – quanto de forma mais geral, referindo-se à solução que emprega este modelo para realizar a automação.

Considera-se que um BPMS, para ser chamado de tal, precisa incluir no mínimo três funcionalidades [Coa95]:

- Modelagem de Processos - Deve prover uma interface para modelagem de processos através do desenho de Workflows;
- Execução de Processos (*Workflow Engine*) - Deve ser capaz de automatizar a execução do modelo fornecido, comunicando-se com os participantes e integrando-se a outros sistemas;
- Monitoramento de Processos - Deve ser capaz de monitorar a execução dos processos, permitindo ao gerente visualizar os processos em execução e fazer levantamentos estatísticos.

Deve-se salientar que todos os dados sobre a execução de cada processo são armazenados pelo BPMS, o que possibilita a realização de um levantamento estatístico completo por parte do gerente para auxílio na tomada de decisões.

A utilização de Workflow para automação de negócios não se restringe ao uso de um BPMS. É comum que empresas criem suas próprias soluções BPM ao combinarem ferramentas de modelagem e execução/monitoramento de diferentes fornecedores.

Alguns BPMS de nome no mercado são o *Oracle BPEL Process Manager*, *BEA Aqualogic BPM Suite* (recentemente adquirido pela Oracle), *Adobe LiveCycle Workflow*, *IBM Websphere BPM Suite*, *JBoss jBPM*, *Intalio BPMS*, *TIBCO iProcess Suite* [BPT07], além dos brasileiros *Ágiles*, da Image Technology e o *Cadmus Workflow*, da Cadmus.

3.5 Uso Atual da Gestão por Processos

Um *survey* realizado pelo *BPTrends* [HW08] entre novembro e dezembro de 2007 caracteriza a utilização da gestão por processos no cenário empresarial atual.

Foram realizadas 274 entrevistas com pessoas de pequenas, médias e grandes empresas, de variadas localidades ao redor do mundo e representando áreas de negócios diversificadas. Dentre estas áreas de negócio, a maior parte dos entrevistados classificou sua empresa entre as áreas de TI, finanças, consultoria de negócios ou entidades governamentais.

A Fig. 3.5 apresenta quais os fatores que influenciaram na adoção da gestão e melhoria de processos por parte das empresas entrevistadas. O gráfico mostra que há um relativo balanceamento entre as principais necessidades para a adoção de

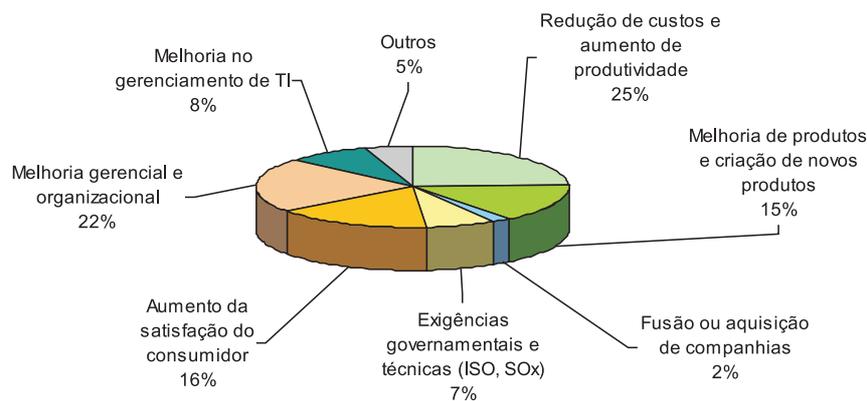


Figura 3.5: Fatores que influenciam na adoção da gestão e melhoria de processos

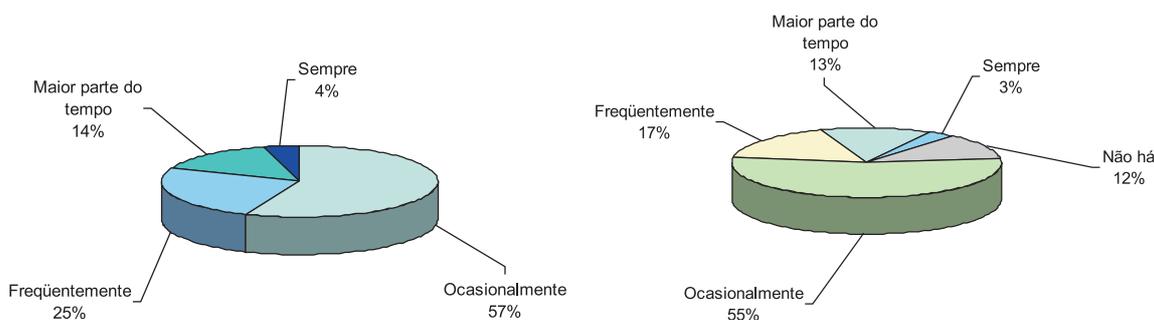


Figura 3.6: Realização de documentação e alinhamento de processos

Figura 3.7: Utilização de métricas para acompanhar o desempenho dos processos da empresa

gestão voltada a processos, que seriam melhoria organizacional, redução de custos, melhoria na qualidade dos produtos e aumento da satisfação do consumidor.

Sobre a maturidade das empresas, a pesquisa avaliou qual o nível de dedicação que é dado ao gerenciamento de processos. Ao responder à pergunta sobre se os processos da empresa estão documentados e são mantidos atualizados, 57% dos entrevistados afirmou que mantêm seus processos ocasionalmente. Este resultado é apresentado na Fig. 3.6.

A pesquisa também verificou se métricas para avaliação de desempenho estão definidas para os processos da empresa. A maior parte das respostas também indicaram que métricas são utilizadas apenas ocasionalmente. Os resultados são demonstrados na Fig. 3.7. Deve-se observar que isto demonstra o quanto o controle quantitativo de processos não é uma atividade trivial. Somam apenas 16% os casos em que métricas são definidas para avaliação quantitativa de *todos* (3%) ou da *maioria* dos processos (13%) da empresa.

Para finalizar, a Tabela 3.1 apresenta que iniciativas estão sendo tomadas pelas empresas no momento em relação à gestão por processos. Os entrevistados poderiam

escolher mais de uma opção quando fosse o caso. O resultado demonstra que a maior preocupação é a do estabelecimento de uma arquitetura para gestão de processos dentro da empresa.

Tabela 3.1: Atividades com as quais as companhias estiveram ativas em 2007

Atividade	Empresas
Desenvolvimento de uma arquitetura de processos	111
Grandes projetos de redesenho de processos	93
Coordenando esforços de melhoria	81
Coordenando esforços para gestão de processos	76
Grandes projetos de automação de processos	71
Desenvolvimento de um sistema de medidas de desempenho	66
Projetos de melhoria aplicando Seis Sigma	66
Treinamento em gestão de processos	58
Treinamento em <i>Lean</i> Seis Sigma	56
Treinamento em análise de processos	52
Redesenho aplicando SCOR, ITIL ou semelhante	31

O escopo deste *survey* foi bem mais amplo do que os resultados apresentados aqui e também verificou que rumos as empresas pretendem tomar durante o ano de 2008. Harmon e Wolf comentam sobre os resultados desta pesquisa que a maior parte das empresas ainda está em estágios iniciais da gestão por processos. Apenas grandes empresas fazem um uso maduro de processos. Notou-se que várias empresas que utilizam processos mantêm sua documentação como forma de obtenção de certificações que o exigem, como o ISO 9000, mas não apresentam um forte alinhamento entre seus processos e sua gestão estratégica. O uso de BPMS, por outro lado, tem feito muitas empresas se voltarem para uma maior sofisticação na forma como lidam com seus processos. A pesquisa demonstrou que 23% das companhias estavam usando uma solução BPMS e outros 25% tinham planos para a sua aplicação no ano de 2008.

Capítulo 4

Melhoria de Processos de Negócio

Este capítulo discute conceitos, metodologias e melhores práticas envolvidos na melhoria de processos de negócio.

Na área de negócios, a melhoria de empresas sempre existiu, mas sua formulação científica e a popularização de técnicas passou a ocorrer apenas no século XX, tendo passado por um grande crescimento desde a década de 80, quando se tornaram comuns termos como *Just-In-Time*, *Total Quality Management*, *Six Sigma*, e *Lean Manufacturing*.

Paul Harmon [HpR03] cita o exemplo do que ocorreu quando as empresas automobilísticas japonesas começaram a concorrer no mercado americano. Durante a reconstrução do Japão após a Segunda Guerra, as empresas japonesas tinham a necessidade de otimizar o seu reestabelecimento, evitando gastos e procurando produzir da forma mais eficiente possível. A disciplina cultural japonesa os levou a aplicar de forma extremamente sistematizada as técnicas que foram levadas por ocidentais, realizando-as de forma bem superior [JN06].

Quando os consumidores norte-americanos começaram a comparar os automóveis fabricados nos Estados Unidos com aqueles importados do Japão, eles perceberam que os carros japoneses eram mais baratos, consumiam menos combustível, apresentavam menos defeitos e tinham uma duração maior que os carros do país [HpR03]. A Tabela 4.1 apresenta as estatísticas das fábricas GM (americana) e Toyota (japonesa) no ano de 1986. Nota-se que a fábrica japonesa não só construía carros melhores, mas também mais rapidamente e gastando menos que os americanos.

Tabela 4.1: Estatísticas das fábricas GM e Toyota (1986)

	GM (em Framingham)	Toyota (em Takoaka)
Tempo bruto de montagem (por carro)	40,7 horas	18,0 horas
Defeitos de montagem (por 100 carros)	130	45
Espaço usado para montagem (por carro)	8,1 m ²	4,8 m ²
Permanência de peças no estoque	2 semanas	2 horas

A melhoria de processos de negócio tem o objetivo de aumentar a vantagem competitiva de uma empresa, aumentando a qualidade de seus produtos e diminuindo o seu custo de produção.

Segundo Michael Porter [HpR03], uma companhia precisa decidir entre três estratégias de mercado:

- Liderança em custos - O objetivo da empresa é ter o produto mais barato do mercado;
- Diferenciação - O objetivo da empresa é garantir um maior grau de satisfação do cliente, pelo qual ele estaria disposto a pagar mais caro, mesmo na existência de um produto concorrente mais barato;
- Nicho especializado - A empresa oferece o produto direcionado para um conjunto específico de clientes, oferecendo características que não são encontradas nos produtos comercializados no mercado, cobrando para isto um preço também maior que o de mercado.

Desta forma, a organização precisa definir seu foco entre redução de custos ou diferenciação do produto e efetuar melhorias em seus processos de acordo com esta decisão. Assim, metas claras podem ser definidas, e esforços de melhoria podem ser direcionados para aquilo que é mais importante.

O maior desafio é criar um produto de alta qualidade a baixos custos. Isto faz com que a empresa assuma uma posição competitiva vantajosa, uma vez que poucas empresas poderão oferecer produtos de qualidade maior por um preço igual ou menor.

A melhoria de processos requer que sejam definidas métricas que possam ser utilizadas para verificar de forma objetiva o comportamento do processo. Como já foi explicado no Cap. 3, estas métricas são definidas a partir das metas estratégicas e dos objetivos que são associados a cada processo, como parte do trabalho do comitê de arquitetura de processos e dos gerentes.

As metas de qualidade de um produto podem ser definida por: 1) leis ou normas vigentes que definem requisitos de qualidade a serem atendidos; 2) exigências do cliente. No primeiro caso, a empresa precisa cumprir as metas impostas para que o produto seja comercializado. No segundo caso, as metas são impostas pelo mercado e pelo grau de satisfação dos clientes com o produto.

Por isso, é importante, antes de qualquer início de projeto de melhoria, que os objetivos e metas da organização sejam definidos e compreendidos.

Os avanços da Toyota na otimização de processos são reconhecidos mundialmente, de maneira que o seu modelo, conhecido por *Toyota Production System* (TPS) [JN06], se tornou uma referência. Apesar de muitas técnicas provenientes do TPS terem se difundido pelo ocidente, há poucos casos em que este modelo funcionou tão bem quanto ocorre no Japão. Mesmo fábricas da própria Toyota ao redor do mundo não apresentam o mesmo sucesso que as japonesas [JN06]. Isto ocorre porque, para se manter uma melhoria contínua, é necessário disciplina e comprometimento de todos os funcionários. A cultura japonesa favorece este cenário [HB07], o que não ocorre da mesma forma em outros países. Isto revela de forma clara que a melhoria de processos não é apenas uma questão de aplicação de técnicas de administração. É necessário que cada pessoa seja envolvida e esteja em busca de oferecer o melhor de si próprio para a empresa.

4.1 Eficiência e Efetividade de um Processo

A melhoria de processos está preocupada com duas características do processo: sua *eficiência* e sua *efetividade*. Estes dois termos serão utilizados de uma forma mais

rigorosa que no senso comum, por isto é importante uma definição para certificar que o seu sentido aqui será compreendido. Podemos definí-los da seguinte forma:

- **Eficiência** - Qualidade do que é *eficiente*, que é capaz de realizar um objetivo sem desperdício de força ou trabalho. Um processo é eficiente quando é capaz de realizar aquilo para o que foi planejado com o uso mínimo de recursos necessários e no menor tempo;
- **Efetividade** - Qualidade do que é *efetivo*, que produz o efeito desejado. Um processo é tão mais efetivo quanto mais ele garante atingir o objetivo definido para ele, sem apresentar desvios.

A qualidade de um processo é definida tanto pela sua eficiência quanto por sua efetividade. As duas características podem parecer semelhantes mas são bastante diferentes e, a depender de quais são os requisitos para o processo, podem vir a ser antagônicas.

Como exemplo do conceito de efetividade, imagine um processo de aprovação de empréstimo. Não é necessário se ater à sua estrutura, mas apenas aos seus resultados finais. O objetivo deste processo hipotético é analisar os riscos de um empréstimo e aprová-lo quando seu risco for menor que 1%, com a finalidade de que não haja prejuízos para a empresa. Devido a falhas no processo, é possível que empréstimos de maior risco sejam aprovados por engano. Se isto ocorrer muito frequentemente, a empresa começará a obter prejuízos, que é o que se desejava evitar. Desta forma, é evidente que o processo está sendo *inefetivo* e que sua qualidade é insatisfatória.

Imagine agora que, para diminuir a probabilidade de falha, a empresa decide que uma verificação redundante será realizada, de forma que, se a primeira estimativa de risco falhar, a seguinte possa captar este erro. Assim, a taxa de erros viria a cair fortemente e os prejuízos seriam evitados, aumentando a efetividade do processo. Observe que, com esta melhoria, o processo passa ser menos eficiente, pois uma mesma atividade está sendo executada duas vezes – o que leva mais tempo e exige mais recursos. Mesmo assim, os prejuízos evitados por esta redundância compensam o seu custo. Isto mostra que nem sempre eficiência e efetividade são melhorados simultaneamente.

4.2 Abordagens para Melhoria

Ao se decidir por realizar um projeto de melhoria em um processo, é preciso definir qual é a meta desta melhoria e decidir qual é a melhor abordagem para se conseguir atingir esta meta, com base na complexidade do processo e no seu valor estratégico.

Podemos classificar as abordagens principais para melhoria em quatro categorias:

- Melhoria de Processos de Negócio (*Business Process Improvement* - BPI): Consiste num esforço focado em otimizar a execução de um processo através de intervenções menores, a partir de um estudo minucioso de sua estrutura e seu funcionamento. Exemplos de ações aplicadas neste tipo de projeto são a eliminação de desperdícios, o treinamento de funcionários para melhor desempenharem suas funções, a aquisição de ferramentas ou máquinas que acelerem a produção, entre outras.

- Redesenho de Processos de Negócio (*Business Process Redesign* - BPR): Trata-se de uma mudança em grande escala no processo. Atividades são redefinidas e todo o processo pode ser recriado, tirando proveito do máximo de oportunidades oferecidas pelo ambiente empresarial.
- Automação: Consiste na aplicação de soluções de TI para automatizar o máximo da execução do processo.
- Terceirização (*Outsourcing*): O processo é transferido parcial ou totalmente para uma outra empresa prestadora de serviços.

Um projeto de BPR é a opção que requer maior investimento financeiro e tempo para realização, mas que potencialmente provê as melhorias mais significativas. O BPI é aplicado a um processo já existente e que se deseja otimizar para atender a novos requisitos de custo e qualidade. A automação, por sua vez, pode ser usada em conjunto com o BPR e o BPI, ou pode consistir em um projeto mais simples, com foco em uma única atividade ou conjunto de atividades.

A terceirização é uma opção quando se percebe que um processo seria melhor executado por uma empresa especialista naquele serviço particular. Estes processos seriam complexos para serem mantidos pela empresa mas não fariam parte do seu negócio principal (processos de apoio).

É possível também classificar as abordagens de melhoria, de acordo com seu objetivo, em dois tipos:

- Inovação - Um novo objetivo foi designado para o processo e é necessário modificá-lo para que a meta seja atingida;
- Controle - O processo é capaz de satisfazer os objetivos, mas não há uniformidade em seu desempenho, sendo necessário melhorá-lo para se conseguir maiores garantias quanto ao seu comportamento.

O primeiro tipo trata de levar o comportamento do processo para um novo ponto de referência. O segundo, consiste em eliminar as variações do seu comportamento em torno deste ponto.

4.3 Metodologias para Melhoria

Dentre as diversas metodologias de melhoria existentes, duas têm tido papel importante no cenário BPM nos últimos tempos: a Seis Sigma (*Six Sigma*) [Pzy03] e a Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*).

A metodologia Seis Sigma é uma técnica recente, criada pela Motorola Corp., que se popularizou rapidamente ao redor do mundo. A Produção Enxuta é fruto do Sistema Toyota de Produção e seus conceitos têm sido utilizados de forma complementar junto com outras abordagens, como ocorre no *Lean Six Sigma* [JN06], junção entre a Produção Enxuta e o Seis Sigma.

4.3.1 Seis Sigma (6σ)

O Seis Sigma, ou *Six Sigma*, 6σ , foi criado pela Motorola Corp. na década de 80 e se popularizou ao começar a ser utilizada pela General Electric, na década de 90.

O termo *Seis Sigma* [Pzy03] é uma referência à medida de desvio padrão, utilizada em estatística e representada pela letra grega σ (sigma). Esta medida representa o desvio apresentado por uma massa de dados em relação ao seu valor médio.

Na metodologia Seis Sigma, o objetivo é aumentar a satisfação do cliente e eliminar os defeitos dos produtos. Um produto defeituoso é entendido como um produto que apresenta desvios mensuráveis de sua especificação. Estes desvios são descritos por uma distribuição normal de probabilidade. Um processo atinge o nível Seis Sigma quando os produtos defeituosos somam 0,0003% do total produzido, ou 3,4 de cada 1 milhão. Este número corresponde à proporção de elementos que estão, em relação à distribuição normal, acima de 3 desvios padrões (σ) de distância da média, para cima ($+3\sigma$) ou para baixo (-3σ) – ou seja, estão fora de um intervalo de tamanho 6σ . Daí o nome desta técnica.

A metodologia Seis Sigma consiste em cinco passos:

1. *Define* (Definir) – Identificar o que é importante para o consumidor, determinar a melhoria e criar um modelo do processo;
2. *Measure* (Medir) – Obter dados sobre o desempenho atual do processo;
3. *Analyze* (Analisar) – Utilizar métodos estatísticos para encontrar as causas dos problemas e desenvolver soluções;
4. *Improve* (Melhorar) – Implementar as soluções no processo;
5. *Control* (Controlar) – Avaliar a solução implementada e garantir sua permanência através do estabelecimento de diretivas e padrões no processo.

Um aspecto distinto de Seis Sigma é que ela distingue precisamente os papéis que atuam em um projeto, seguindo uma ordem hierárquica. Dentre estes papéis, existem os *Champions*, *Master Black Belts*, *Black Belts*, *Green Belts* e *Yellow Belts*. Cada um tem responsabilidades com um tipo de atividade e servem como guia para os papéis abaixo de sua hierarquia.

4.3.2 Produção Enxuta (Lean Manufacturing)

No Japão, surgiu um conceito de produção que veio a se tornar referência mundial e que levou a empresa Toyota Motor Corp. a se tornar líder no mercado automobilístico. O Sistema de Produção da Toyota (TPS) se tornou referência por sua eficiência e qualidade. A Produção Enxuta é um dos pilares deste sistema.

De forma resumida, a Produção Enxuta ou, mais conhecida pelo termo em inglês, *Lean Manufacturing*, é um conjunto de práticas de produção e gestão que têm como objetivo reduzir ao máximo o desperdício dentro de uma empresa.

Existem três tipos de desperdício, de acordo com o Lean, que devem ser evitados. Eles são expressos pelos termos japoneses *Muda*, *Muri* e *Mura*:

- **Muda** - Trabalho que não adiciona valor;
- **Muri** - Sobrecarga de trabalho;
- **Mura** - Irregularidade.

O Lean oferece um conjunto de práticas através das quais estes desperdícios são sistematicamente eliminados em uma empresa.

Outra característica do Lean é que ele consiste em uma metodologia de melhoria contínua. Ou seja, uma vez inserida na empresa, deve ser aplicada diariamente, buscando-se sempre melhores resultados.

A melhoria contínua no Lean é obtida pela aplicação do princípio de *Kaizen* (literalmente, mudança para o bem). A idéia do *Kaizen* é a de que uma melhoria pode começar a qualquer momento, quando um pequeno grupo se junta para discutir um problema encontrado, procura uma solução e implanta esta solução no processo.

Outra prática aplicada no Lean é o conceito de organização chamado de 5S. Seu objetivo é maximizar o desempenho dos trabalhadores através de uma melhor organização do seu local de trabalho. O nome 5S vem dos cinco princípios que regem esta metodologia, que têm nomes iniciados por *S* na língua japonesa. São eles:

- **Seiri** (Disposição, arranjo) – Manter somente no local de trabalho aquilo que é essencial. O restante é armazenado ou descartado.
- **Seiton** (Praticidade) – Organizar ferramentas, equipamentos e utensílios de forma a fornecer um rápido acesso e não interromper o fluxo de trabalho;
- **Seisō** (Limpeza) – Limpar o local de trabalho diariamente e retornar cada coisa para o seu devido lugar;
- **Seiketsu** (Padronização) – Padronizar atividades e práticas de maneira que cada um saiba exatamente quais são as suas responsabilidades;
- **Shitsuke** (Diligência) – Não permitir que as práticas sejam abandonadas e reavaliar frequentemente os padrões e operações.

Estas diretivas, quando seguidas corretamente, trazem benefícios significativos para a eficiência e qualidade do processo e oferecem melhores condições de trabalho para os funcionários, aumentando a sua produtividade e satisfação.

4.4 Fases de um Projeto de Melhoria

Apesar de existirem diferentes metodologias de melhoria de processos, cada uma aplicando sua própria estratégia, pode-se definir uma seqüência lógica que é seguida por qualquer projeto de melhoria.

De forma semelhante à metodologia para BPR apresentada por Harmon [HpR03], pode-se dividir, de forma geral, um projeto de melhoria em 5 fases:

1. Planejamento
2. Modelagem e Análise
3. Redesenho/Melhoria
4. Desenvolvimento
5. Transição

A seguir, cada uma destas fases é discutida. Observe que todo o arcabouço de práticas existente em Gerência de Projetos se aplica aos projetos de melhoria (por exemplo, as recomendações do guia de práticas PMBOK – *Project Management Body of Knowledge*) [Pro05], não havendo aqui preocupação no tratamento de questões gerenciais.

4.4.1 Fase 1: Planejamento

Uma vez que o comitê de estratégia da empresa (ver Cap. 3) tenha traçado as novas metas para a empresa e que o comitê de arquitetura de processos tenha definido os objetivos a serem alcançados por cada processo, estas diretivas são utilizadas como entrada para a fase de planejamento do projeto.

A princípio, o responsável pelo projeto deverá analisar o estado atual do processo e os objetivos traçados, e então definir como o problema será abordado. Ele então irá escolher que técnica de melhoria será utilizada e, a partir disso, selecionará a equipe que irá fazer parte do projeto. O projeto pode ser realizado por uma equipe selecionada dentro da empresa, por consultores externos ou por uma combinação destes.

Uma vez definida a equipe, é necessário definir claramente o escopo do projeto, prazos e restrições que possam existir no cenário da organização. Um cronograma deve, então, ser definido e um orçamento elaborado.

Ao final, um *Plano de Projeto* deve ser criado. Este plano precisa ser aprovado pelo comitê executivo.

4.4.2 Fase 2: Modelagem e Análise

Nesta fase, é realizado o estudo da posição atual do processo. A depender da técnica de melhoria sendo aplicada, atividades diferentes podem vir a ser executadas neste momento. O importante é que uma visão objetiva do processo seja criada e avaliada sob a ótica das metas que precisam ser atingidas.

Para projetos que lidam com processos automatizados por sistemas de gestão, é importante analisar os dados estatísticos mantidos pelo sistema. Quando não há dados, será preciso obter estimativas sobre o comportamento do sistema de alguma forma. Quando necessário, esta informação pode ser utilizada para a criação de modelos estocásticos do processo (de fato, isto será feito na metodologia definida neste trabalho, apresentada no Cap. 7). No caso mais simples, um diagrama que represente o processo é suficiente. Caso este não exista, deverá ser criado. Este diagrama é chamado de *diagrama ESTÁ (AS IS)* [HpR03].

É preciso observar, durante esta fase, todas as características do processo que têm influência sobre os objetivos a serem atingidos e analisar questões como: *Que métricas serão usadas para medir o sucesso do processo em relação ao novo objetivo? Que fatores têm impacto sobre estas métricas? O processo apresenta o comportamento que se esperava ou há algo novo, ainda não observado? Como é feito o gerenciamento deste processo?*

A resposta a estas e outras questões irá trazer o entendimento sobre o processo necessário para que sejam realizadas as melhorias nas fases seguintes.

É importante também avaliar se o plano elaborado na fase anterior precisa ser ajustado diante das informações obtidas através da análise do processo. É possível

que o processo apresente um comportamento que não pôde ser observado antes destas análises.

O resultado desta fase é a documentação do processo atual contendo informações como:

- Modelo *ESTÁ* do processo;
- Lista de métricas que serão usadas para medir o comportamento do processo;
- Lista de problemas encontrados no processo atual;
- Levantamento da estrutura de gerenciamento do processo existente (em relação ao seu novo objetivo);
- Versão revisada do plano de projeto.

4.4.3 Fase 3: Redesenho/Melhoria

Uma vez que o estado atual do processo seja conhecido pela equipe, pode ser iniciada a procura por oportunidades de melhoria.

É durante esta fase que as técnicas de melhoria de processos conhecidas pela equipe são aplicadas para se obter um novo processo que satisfaz as metas do projeto. Fatores como tempo, complexidade e custos das mudanças a serem feitas também são levados em consideração pela equipe.

A equipe poderá vir a criar diversos modelos de processos, correspondendo a diferentes opções de melhoria que poderiam ser realizadas. Estes modelos são chamados de modelos *PODERIA (COULD BE)* [HpR03] do processo. Eles são importantes para a realização de simulações, análise de custos, entre outras.

Ao final desta fase, a equipe decide por um modelo final do processo que será implementado. Este é o modelo *DEVERIA (SHOULD BE)* [HpR03] do processo. Ele define qual a estrutura necessária para que o processo possa atingir as metas estipuladas.

Além do modelo melhorado do processo, também é necessário definir nesta fase as mudanças que podem vir a ser necessárias na estrutura de gerenciamento existente para o processo atual, incluindo a definição de novas métricas que serão usadas para acompanhá-lo. Dependendo do tipo de mudança, pode ser necessário descrever novos recursos que precisam adquiridos, novas definições de cargos que foram criados ou modificados e quais os requisitos dos funcionários que vão ocupar aqueles cargos.

4.4.4 Fase 4: Desenvolvimento

O objetivo desta fase é preparar a infra-estrutura necessária para que o novo processo seja implementado.

Isto pode exigir:

- aquisição de recursos;
- treinamento de funcionários;
- preparação de sistemas de software;
- reformas na estrutura da empresa.

É importante observar que estas atividades são realizadas antes que o novo processo seja posto em prática. O processo anterior deve ser mantido em funcionamento sem modificações enquanto a infra-estrutura para o novo processo não está completamente montada.

É comum, em projetos que envolvem grandes mudanças na empresa, que durante esta fase também seja realizado um esforço para instrução e motivação dos funcionários para que o impacto das mudanças não seja recebido negativamente. É essencial que os funcionários entendam as mudanças inseridas pelo novo processo e se comprometam com ele.

4.4.5 Fase 5: Transição

Quanto maiores as diferenças existirem entre a versão *ESTÁ* do processo e a sua versão *DEVERIA*, maior a complexidade de transição de um para o outro.

Durante esta fase, o processo antigo é abandonado e o novo processo é iniciado. Alguns cuidados que devem ser tomados durante esta fase são:

- funcionários devem estar treinados e comprometidos a mudar a forma como trabalhavam antes;
- gerentes devem conhecer as novas metas do processo e estar prontos para lidar com as métricas definidas;
- softwares devem estar testados, implantados e configurados.

É necessário que a transição seja acompanhada, para verificar se está sendo realizada conforme foi planejado. Provavelmente, será necessário que uma ou mais pessoas fiquem responsáveis por liderar a transição e resolver os problemas que possam vir a surgir ao longo dos primeiros dias do novo processo.

4.5 Boas Práticas para Melhoria de Processos

Além das metodologias para melhoria já apresentadas, um conjunto de boas práticas são reconhecidas pela literatura. Um total de trinta destas práticas foram compiladas por Reijers [MR05] e classificadas quanto ao seu impacto no processo de acordo com quatro critérios de otimização: tempo, custo, qualidade e flexibilidade. Uma vez que nem sempre estes critérios concordam entre si, um *tradeoff* entre eles deve ser ponderado, para que estas práticas possam ser aplicadas da melhor forma possível.

Um *survey* [MR04] realizado em 2003/2004 identificou as práticas mais populares, dez das quais estão descritas a seguir. As práticas estão ordenadas em ordem decrescente de popularidade, de acordo com os resultados da pesquisa.

1. **Eliminação de Tarefas:** Quando uma atividade realizada no processo não adiciona valor ao produto ou não serve como apoio a uma atividade que adiciona valor, é recomendável que ela seja eliminada do processo. A eliminação reduz o tempo de execução e os custos. Em alguns casos, entretanto, pode vir a comprometer algum aspecto da qualidade do sistema, sendo necessário certa cautela quanto a isto.

2. **Novas Tecnologias:** Sempre que possível, deve-se usar o que há disponível na tecnologia para superar os limites impostos fisicamente ao processo, aumentando o seu desempenho. Novas tecnologias, entretanto, podem ser custosas e necessitam de treinamento dos funcionários para se evitar falhas.
3. **Composição/Decomposição de Tarefas:** Quando existem muitas atividades pequenas sendo realizadas, há uma perda de desempenho no processo, devido à necessidade de transição entre elas. Neste caso, é recomendável unir estas tarefas em uma única atividade. Isto diminui o tempo de transição e as chances de erros, aumentando a qualidade. Por outro lado, uma atividade muito complexa acaba por se tornar mais propensa a falhas e diminui a flexibilidade dos recursos. Neste caso, é recomendável decompor a atividade em atividades menores e menos complexas.
4. **Paralelismo:** Deve-se buscar ao máximo realizar atividades em paralelo. Isto diminui consideravelmente o tempo de execução do processo. Muitas vezes atividades são executadas sequencialmente sem que haja nenhuma relação de ordem definida entre elas, prejudicando o desempenho do processo. A desvantagem desta prática é que o processo pode vir a se tornar mais caro e mais propenso a erros.
5. **Especialista-Generalista:** Um funcionário capacitado para ser especialista em uma função é capaz de realizá-la em menor tempo e com qualidade superior. Por outro lado, um funcionário capaz de realizar diversas atividades diferentes adiciona maior flexibilidade ao processo, podendo ser alocado de acordo com a demanda. Decidir quantos e quais funcionários dentro da organização devem ser treinados para serem especialistas ou generalistas é uma questão que necessita atenção, pois o impacto sobre o desempenho do processo pode ser muito grande.
6. **Reordenar:** É recomendável que as atividades que podem ser executadas em momentos posteriores sejam adiadas o tanto quanto possível. Isto evita que elas sejam executadas para um pedido que posteriormente pode vir a ser cancelado ou para o qual aquela atividade viria a ser desnecessária. Desta forma, custos são reduzidos e tempo é economizado.
7. **Integração com Cliente/Fornecedor:** Esta prática recomenda investir em uma integração entre os processos da empresa com os processos de seus clientes/fornecedores. Este tipo de integração permite que se obtenha o máximo do desempenho dos processos quando precisam trabalhar em conjunto, reduzindo tempo e custos. A desvantagem é que é introduzida uma dependência no processo, diminuindo sua flexibilidade.
8. **Delegar poderes:** Aumentar o poder de decisão para funcionários ajuda a diminuir o gargalo do gerenciamento em baixo nível, permitindo que o processo ocorra de forma mais fluida e evitando sobrecarga dos gerentes. Isto, por outro lado, pode vir a comprometer a qualidade do processo, uma vez que a probabilidade de ocorrência de decisões erradas aumenta.

9. **Número de Envolvidos:** É recomendável reduzir o número de envolvidos no processo, entre departamentos e pessoas. Desta forma, se reduz o tempo para coordenação de ações e o gerenciamento é facilitado.
10. **Atribuição de Pedidos:** Esta prática recomenda manter um funcionário executando atividades relacionadas a um mesmo pedido o tanto quanto for possível. Desta forma, este funcionário perderá menos tempo se familiarizando com cada pedido que lhe é atribuído. Isto também diminui as chances de erros. A desvantagem é que a flexibilidade dos recursos é reduzida.

Capítulo 5

Modelagem e Análise de Workflow

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre Workflow, sua terminologia, padrões amplamente aceitos, além das abordagens mais utilizadas para a sua modelagem e análise.

A automação de processos através de Workflow vem experimentando grande crescimento na indústria de processos de negócio. Como observado no *survey* apresentado no Cap. 3, 23% das companhias utilizam sistemas baseados em Workflow e outros 25% pretendem implantar estes sistemas no ano de 2008.

O Workflow é um modelo do processo que, além de representá-lo graficamente, também apresenta todas as informações que são necessárias para que a sua execução seja automatizada.

Existem diversas notações para descrição de Workflow. As notações em maior evidência atualmente são *Diagrama de Atividades UML*, *Business Process Modeling Notation (BPMN)*, *XML Process Description Language (XPDL)* e *Business Process Execution Language (BPEL)*. Além delas, existem as representações formais, propostas por pesquisadores como Wil van der Aalst [AH02, AH03], Hajo Reijers [Rei02] e outros [LFZ04a, NAR05, LS00]. Estas representações não têm o objetivo de serem executáveis, mas podem ser utilizadas para realizar análises matemáticas sobre os modelos de Workflow, com o intuito de caracterizar o seu desempenho e qualidade.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os elementos básicos que compõem um Workflow, as principais características das notações e modelos existentes e as técnicas mais utilizadas para sua análise.

5.1 Propósito da Modelagem de Processos

Segundo Reijers [Rei02], a modelagem de processos pode ser realizada para diversos propósitos. Dentre eles:

- Treinamento e comunicação – O modelo pode ser utilizado para que novos funcionários possam tomar conhecimento do processo em que irão atuar, seus objetivos e sua relação com outros processos da empresa;
- Levantamento de custos – O modelo pode ser utilizado para o cálculo de custos e definição de orçamentos para um processo;

- Simulação e análise – O modelo pode servir como ferramenta para tomada de decisão através da realização de simulações e análises que forneçam informações quantitativas e qualitativas;
- Documentação e gestão de conhecimento – O modelo pode servir como documentação do processo, sendo definido numa linguagem clara e que evite ambigüidades, buscando garantir um entendimento uniforme do processo por parte de toda a organização;
- Execução – O modelo pode ser utilizado em ferramentas de execução de Workflow para automatizar a execução do processo, como mencionado no Cap. 3;
- Desenvolvimento de sistemas – O modelo pode ser utilizado para especificar requisitos no desenvolvimento de sistemas que venham a ser implantados na empresa.

A variedade de propósitos é acompanhada também por uma variedade de modelos e notações. Um modelo que é utilizado para treinamento de pessoal contém informações diferentes de um modelo destinado à simulação.

A linguagem BPEL, por exemplo, é destinada unicamente à execução, não possuindo nenhuma representação gráfica. A BPMN, por outro lado, oferece uma representação gráfica que pode ser utilizada em diversos níveis de abstração. Pode ser utilizada para dar uma visão geral do processo, a nível gerencial, ou para apresentar detalhadamente o seu comportamento, no nível de execução.

5.2 Terminologia

A *Workflow Management Coalition* (WfMC) é uma organização sem fins lucrativos formada por um conjunto de empresas e grupos de pesquisa ao redor do mundo, trabalhando na construção de uma padronização na implementação de Workflow. Sua idéia principal é explorar as semelhanças que existem entre os produtos de gestão de Workflow para permitir uma melhor integração e um maior grau de interoperabilidade entre eles. Isto se torna vantajoso tanto para usuários quanto para desenvolvedores de soluções para este mercado [Coa99].

Segundo a WfMC [Coa99], Workflow é

"A automação de um processo de negócio, total ou parcial, na qual documentos, informações ou tarefas são passados de um participante a outro para a realização de ações."

Esta definição apresenta o aspecto funcional do Workflow. Em geral, utiliza-se o termo Workflow também para se referenciar ao modelo em si do processo que está sendo automatizado.

São apresentados a seguir os principais elementos que compõem um Workflow e sua definição, de acordo com o glossário da WfMC [Coa99].

Definição do Processo - É a representação de um processo numa forma que pode ser manipulada por um sistema automatizado. Inclui atividades, critérios de início e fim, participantes, aplicações e dados envolvidos no processo.

Instância de Processo ou *Case* - Quando um processo é iniciado para tratar um pedido de cliente, diz-se que uma instância do processo está em execução. Para cada pedido recebido, uma instância do processo é iniciada, controlada e, em algum momento futuro, finalizada pelo sistema, de acordo com a definição do processo. O termo *Case* refere-se ao mesmo conceito e é mais usado em modelos formais. Por simplificação, este termo será adotado aqui.

Participante - É um recurso que executa uma atividade no processo. Um participante pode ser tanto uma pessoa quanto um sistema que será executado quando a atividade precisar ser realizada.

Papel - Indica um grupo de recursos que apresentam as mesmas qualificações, atributos e habilidades. Pode-se dizer que corresponde a um *cargo* em uma empresa. Um funcionário pode exercer o papel do vendedor, o papel do supervisor e assim por diante.

Atividade - Corresponde à descrição de uma unidade de trabalho que forma um passo lógico na execução de um processo. Atividades são relacionadas a participantes, que são responsáveis por sua execução.

Instância de Atividade - Quando uma atividade é iniciada por um participante, durante a execução de uma instância de processo, diz-se que uma instância da atividade está em execução.

Worklist - Uma lista de pedidos aguardando pela execução de uma atividade por parte de um participante. Uma vez que o sistema verifica a necessidade de execução de uma atividade, um novo item é acrescentado a esta lista, informando aos participantes responsáveis que sua atuação é necessária. Quando o participante informar que a atividade para aquele pedido foi concluída, o item é removido da lista. Cada participante, ou grupo de participantes, é relacionado a uma Worklist particular.

Work Item - Cada um dos itens presentes em uma Worklist. O Work Item apresenta os dados que são necessários para a execução da atividade correspondente.

Sub-processo - Um processo que é iniciado por um outro processo (ou sub-processo) e que é executado como parte integrante do processo que o invoca. Um sub-processo possui sua própria definição de processo e é utilizado com o propósito de modularizar o modelo do processo e permitir o reuso de estruturas comuns a diversos processos.

Evento - A ocorrência de uma dada condição (interna ou externa ao sistema) que obriga o sistema a realizar uma ou mais ações. Um evento possui dois elementos: Um *gatilho*, que é o reconhecimento das condições associadas ao evento e uma *ação*, que é a resposta que o sistema deve dar em seguida ao gatilho.

Exceção - Tipo de evento que é disparado por uma condição de erro na execução do processo, levando à necessidade de iniciar um procedimento de recuperação.

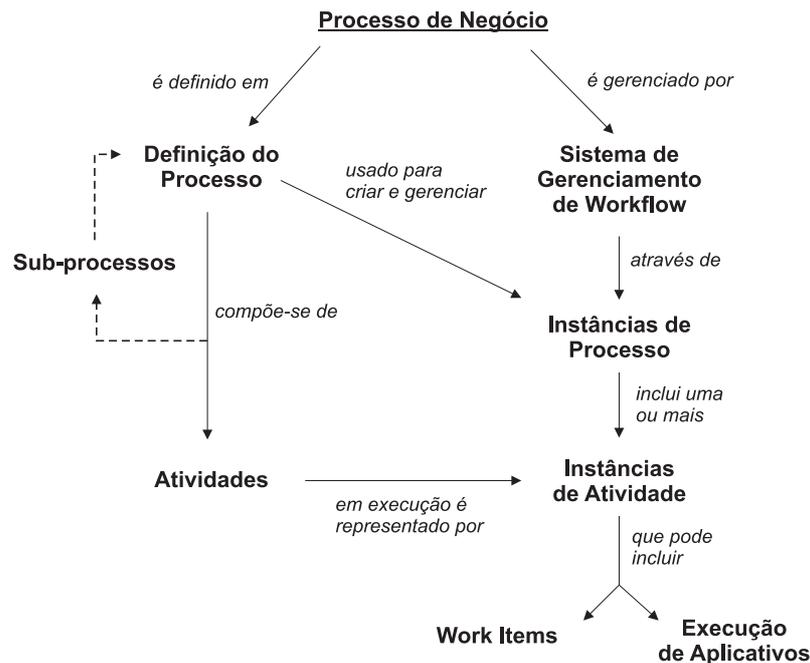


Figura 5.1: Relacionamento entre os principais elementos de um Workflow

A Fig. 5.1 apresenta o relacionamento entre os principais elementos.

Um Workflow é executado por um *Motor de Workflow (Workflow Engine)*. Este motor é responsável por ler a descrição do processo e gerar requisições ao sistema para executar cada atividade. Além disso, ele é responsável por guardar o histórico de todas as execuções para futura auditoria e levantamento estatístico.

Quando uma atividade é automatizada, o motor gera uma requisição para a aplicação responsável por executá-la. Quando a aplicação conclui o seu serviço, o motor reúne os resultados e repassa-os para o próximo participante, conforme a definição do processo que lhe foi fornecida.

Quando uma atividade é executada por um recurso humano, o sistema gera uma requisição para o *Worklist Handler*, que transforma esta requisição em um *Work Item*. Este item será apresentado na *Worklist* do participante, indicando que a atividade precisa ser executada por ele. Uma vez concluído, o participante indica ao sistema que aquele item já foi processado e fornece as informações que possam ter sido geradas pela atividade. O motor, então, prossegue com a execução do Workflow conforme a definição do processo.

Neste cenário, a Arquitetura Orientada a Serviços (*Service-Oriented Architecture – SOA*) se tornou extremamente difundida, podendo-se dizer que é a arquitetura dominante nas aplicações de Workflow. Sua estratégia se baseia em criar serviços, normalmente *Web Services*, que são capazes de executar cada tarefa da lógica de negócios. O motor de Workflow pode se comunicar com estas aplicações através de um protocolo de serviços (tal como o SOAP - *Simple Object Access Protocol*) de forma uniforme. Desta forma, o desenvolvimento da automação de processos se torna mais econômico e a melhoria e realinhamento de processos são realizados de maneira mais rápida.

5.3 Estruturas de Controle de Fluxo

Cada um dos elementos apresentados até o momento são representados de forma diferente nas notações de Workflow. Além destes elementos, as estruturas de controle de fluxo disponíveis em cada notação são um aspecto a ser levado em consideração.

As estruturas básicas comuns a qualquer Workflow são:

- Escolha (XOR) - representa um ponto em que o fluxo se divide em dois ou mais caminhos e uma decisão precisa ser tomada quanto a qual dos dois caminhos deve ser seguido;
- Fusão - representa um ponto onde caminhos diferentes são reunidos novamente em um caminho único;
- Paralelismo (AND) - representa um ponto a partir do qual são iniciados dois ou mais Sub-processos em paralelo para executarem um mesmo *Case*;
- Sincronização - representa um ponto em que caminhos paralelos precisam ser sincronizados, de forma que o processo só pode ser continuado quando todos os Sub-processos executando em paralelo para um *Case* forem concluídos;
- Iteração - corresponde a uma parte do processo que precisa ser executada mais de uma vez para processar um mesmo *Case*.

A partir delas, é possível montar um grande número de processos com relativa complexidade.

5.3.1 Padrões de Workflow

Apesar de grande parte dos processos ser composta por estas estruturas, existem diversas outras maneiras de controlar o fluxo do Workflow que não são representáveis em termos das estruturas mencionadas. O pesquisador Wil van der Aalst identificou as mais comuns e categorizou-as sob o nome de *Padrões de Workflow* [AHKB03]. Muitos destes padrões não são suportados pela maioria das notações ou são implementados de forma complexa, não havendo uma representação direta.

A seguir é apresentada uma breve descrição de alguns destes padrões. A lista completa contém 38 padrões, além das estruturas básicas já mencionadas, e está sempre em atualização. Há um site criado para manter esta lista que contém descrição detalhada e animações do funcionamento de cada um deles (www.workflowpatterns.com), que pode ser consultado por aquele que tiver maior interesse no tema. Cada padrão possui um código que o identifica, para facilitar a sua referência. Os padrões são divididos em categorias, de acordo com a sua função.

Padrões de Ramificação e Sincronização Avançados

Estes padrões consistem em estruturas que permitem uma mistura de caminhos alternativos e paralelos.

WCP6 Multi-Choice – representa um ponto do fluxo no qual o *Case* pode seguir por um ou vários caminhos diferentes, executando em paralelo quando mais de um caminho é escolhido. Corresponde a um OU não-exclusivo.

WCP7 Structured Synchronizing Merge – consiste no complemento ao Multi-Choice, correspondendo a um ponto onde caminhos são reunidos novamente. A reunião é feita de tal forma que um *Case* que se dividiu em mais de um caminho seja sincronizado neste ponto, enquanto que *Cases* que tenham seguido por um único caminho passem sem esperar.

WCP8 Multi-Merge – consiste num outro tipo de reunião de caminhos que foram divididos pelo Multi-Choice, mas desta vez não há sincronização, de forma que mesmo instâncias que se dividiram em caminhos paralelos são processadas independentemente.

WCP9 Structured Discriminator – representa um ponto de junção de caminhos paralelos onde não há sincronização. A instância que primeiro chegar continua o seu processamento, enquanto que as suas cópias são eliminadas quando chegam a este ponto.

Padrões de Múltiplas Instâncias

Estes padrões representam situações em que múltiplos *threads* são criados para a execução de uma mesma atividade para processar o mesmo *Case*.

WCP12 Multiple Instances without Synchronization – corresponde a uma atividade que necessita da criação de múltiplas instâncias para o processamento de um *Case*, mas que não necessita de sincronização entre elas. Uma vez que uma das instâncias seja concluída, o processamento do *Case* prossegue para as atividades seguintes. As instâncias que ainda estão em execução são continuadas, mas são eliminadas quando concluídas, não seguindo processamento no Workflow.

WCP13 Multiple Instances with a Priori Design-Time Knowledge – consiste em uma situação em que múltiplas instâncias são criadas para processar um *Case*, onde o número necessário é fixo e conhecido durante a definição do Workflow. As instâncias precisam ser sincronizadas, de maneira que o processamento do *Case* prossegue apenas quando todas são concluídas.

Padrões Baseados em Estados

Estes padrões representam situações na qual existe dependência de condições globais do processo.

WCP18 Milestone – consiste em uma situação na qual uma atividade só pode ser executada caso uma condição específica seja satisfeita. Esta condição se refere a um estado no processamento que foi atingido, mas não ultrapassado, durante a execução do processo.

WCP39 Critical Section – representa uma situação em que existem duas ou mais partes (seções) do Workflow que não podem ser executadas em paralelo. As atividades em uma seção precisam ser concluídas para que outra seja iniciada.

WCP40 Interleaved Routing – Um conjunto de atividades precisa ser executado de forma seqüencial, mas não há uma ordem pré-definida em que elas devem ocorrer.

Padrões de Iteração

Estes padrões caracterizam situações que ocorrem em estruturas iterativas.

WCP10 Arbitrary Cycles – representa uma estrutura iterativa em que podem existir diversos pontos de entrada e de saída.

WCP22 Recursion – representa um ciclo que é criado quando uma atividade requisita a execução dela mesma para processar algum dado sobre o *Case* em andamento. A atividade só poderá concluir quando todas as 'atividades-filha' forem concluídas.

Padrões de Gatilho

Padrões de gatilho representam a ocorrência de eventos no Workflow.

WCP23 Transient Trigger – representa a ocorrência de um evento que permite a execução de uma atividade que esteja aguardando por ele. Caso não haja nenhuma atividade em espera, o evento é perdido.

WCP24 Persistent Trigger – representa a ocorrência de um evento que é armazenado pelo sistema até que uma atividade possa processá-lo.

5.4 Notações de Workflow

Atualmente, existe um grande número de notações para modelagem de processos de negócio, propostas por diferentes organizações. Nesta seção, apresentaremos uma visão geral de algumas destas notações.

5.4.1 Diagrama de Atividade UML

A linguagem UML apresenta como padrão para modelagem de processos de negócio o Diagrama de Atividade. Este diagrama apresenta os elementos essenciais para a definição de processos de negócio complexos, tais como:

- atividades;
- papéis;
- regras de decisão;
- paralelismo e sincronização;
- fluxo de dados.

O Diagrama de Atividade permite a utilização de expressões e condições (em linguagem natural) para a especificação das regras de decisão ao longo do fluxo. Isto permite que comportamentos bastante complexos sejam definidos. A utilização de linguagem natural tira proveito do fato de o Diagrama de Atividades UML ser voltada à documentação e entendimento do processo, não havendo compromisso com a sua execução a partir de um motor.

A Fig. 5.2 apresenta os elementos básicos da notação UML. Esta notação é utilizada para representar os Workflows ao longo deste trabalho. Cada raia em uma piscina representa um participante no Workflow. Diagramas com mais de uma piscina representam processos diferentes que podem se comunicar.

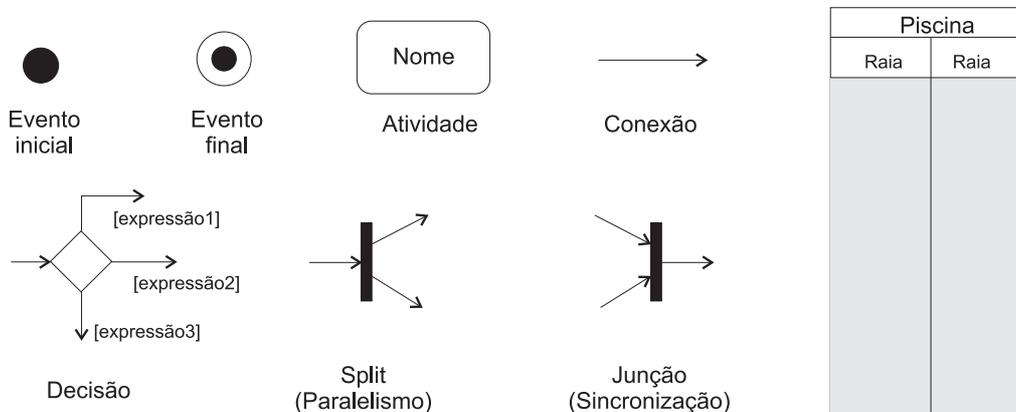


Figura 5.2: Elementos Básicos do Diagrama de Atividade

5.4.2 Business Process Modeling Notation

A *Business Process Modeling Notation* (BPMN) [Whi06] é uma das notações mais utilizadas para representação gráfica de processos de negócio. Foi inicialmente proposta pelo Business Process Management Institute (BPMI), que hoje está integrado à OMG.

A BPMN suporta vários níveis de representação de processos. Pode ser utilizada desde para dar uma visão geral no fluxo de atividades até para ser diretamente executada por um motor de Workflow. Ela apresenta notação para representação de eventos (mensagens, disparo de temporizadores, ocorrência de erros), fluxo de dados e artefatos e Sub-processos.

Esta linguagem é mais complexa em diversos aspectos que o Diagrama de Atividades UML e é a mais utilizada pelos especialistas em processos. Muitos defendem que ela é a notação ideal para fazer o meio entre os executivos e os desenvolvedores de TI [Whi06].

5.4.3 Business Process Execution Language

A *Web Services Business Process Execution Language* (WS-BPEL ou simplesmente BPEL) foi criada com o objetivo de especificar a execução de processos de negócio baseados em *Web Services*. O processo é descrito seguindo um formato em XML, não possuindo uma notação gráfica própria.

A BPEL é mantida pela OASIS e foi desenvolvida em conjunto pela IBM, BEA, SAP, Siebel e Microsoft.

Um processo descrito em BPEL é diretamente fornecido como entrada para o motor de execução, que publica o processo na forma de um *Web Service*. O uso de *Web Services* é bastante vantajoso para o cenário do Workflow. Isto porque a interface de comunicação entre *Web Services* é padronizada. As mensagens trocadas entre o processo e as aplicações que são executadas pelo motor de execução são

definidas a partir desta interface de forma natural. Por essa razão, é possível redefinir processos ou atualizar serviços de forma fácil e rápida.

Estas características fizeram da BPEL uma das linguagens mais importantes no uso da Arquitetura Orientada a Serviços (SOA).

5.4.4 XML Process Definition Language

A *XML Process Definition Language* (XPDL) [WFM02] foi desenvolvida pela WfMC como uma linguagem de intercâmbio entre as diversas notações de processo existentes. Para tanto, ela oferece suporte às estruturas fundamentais que qualquer Workflow precisa conter e possibilita o uso de extensões para representação de atributos específicos de uma ou outra ferramenta.

A XPDL é compatível com notações executáveis. Desta forma, ela permite a definição de expressões para tomada de decisão e de participantes que são sistemas de software a serem executados. Estes precisam de dados de entrada (IN) e produzem dados de saída (OUT) que são transmitidos para outros participantes.

Como este tipo de informação é representada de forma geral, a notação se torna mais complexa do que outras como a BPEL, que é específica para Web Services.

5.5 Modelos Formais e Análise de Workflow

A modelagem formal de Workflow tem o propósito de verificar propriedades do processo a partir da aplicação de técnicas matemáticas. Através de um modelo formal, pode-se constatar com segurança que o sistema apresenta propriedades desejadas (ou que não apresenta propriedades indesejadas).

Existem dois tipos de análise de maior interesse para a modelagem de processos:

- Corretude: Verifica propriedades qualitativas do processo, tais como ausência de *deadlock*, ausência de *livelock* e garantia de término correto. Esse tipo de análise verifica se existe a possibilidade de o sistema alcançar algum estado imprevisto e indesejado.
- Desempenho: Possibilita obter medidas quantitativas do desempenho do processo, tais como tempo de resposta, número de clientes no sistema e outras.

A verificação destas propriedades para um Workflow é de grande importância. Uma vez que a execução do Workflow será automatizada, recebendo o mínimo de intervenção humana possível, iniciar a execução de um processo incorreto pode vir a causar grandes prejuízos antes mesmo que se perceba a existência do erro.

Além disso, criar um processo que consiga apresentar o máximo desempenho é um fator importante para a competitividade de uma empresa. Um processo mal desenhado irá causar desperdícios e diminuir a produtividade. A possibilidade de estimar o desempenho do Workflow durante a fase de projeto é uma importante ferramenta para a melhoria e otimização do processo.

Neste contexto, as redes de Petri [Pet62] têm sido aplicadas com sucesso. Esta seção apresenta o estado da arte nesta área de pesquisa.

Alguns termos ou conceitos matemáticos mencionados podem não ser familiares ao leitor, tais como a teoria de processos estocásticos [Pap91] e as redes de Petri. O Apêndice A contém um resumo dos conceitos utilizados aqui e em capítulos posteriores, que são necessários para o total entendimento do que se apresenta.

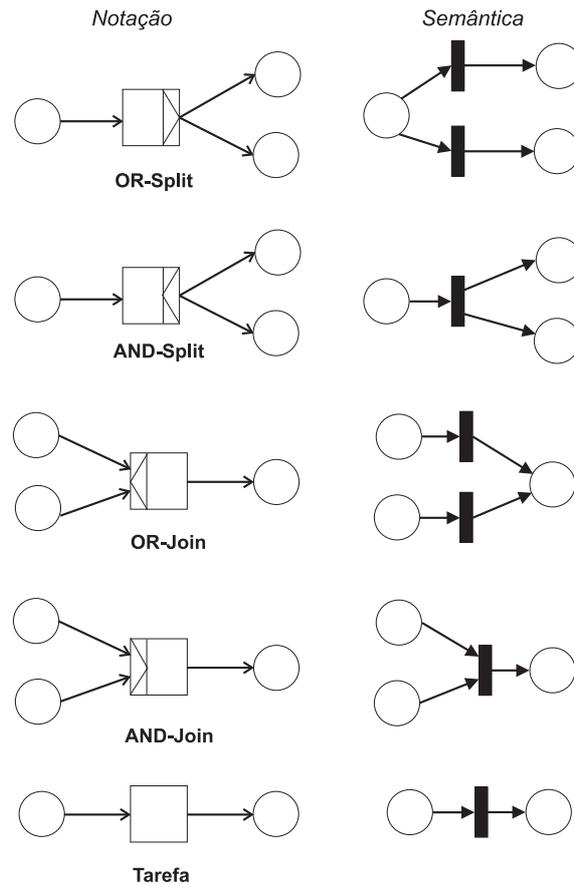


Figura 5.3: Elementos básicos da WF-Net e sua rede de Petri equivalente

5.5.1 Workflow Net

O modelo Workflow Net (WF-Net) foi criado por Wil van der Aalst [Aal98, AH02] com o objetivo de possibilitar a verificação de propriedades qualitativas de Workflow através da aplicação de redes de Petri.

Sua abordagem se baseia na definição de meta-transições para representar estruturas do Workflow, chamadas de *tarefas (tasks)*. Estas meta-transições correspondem a estruturas em redes de Petri.

A Fig. 5.3 apresenta os elementos de que se compõe a WF-Net e suas redes de Petri correspondentes. A Fig. 5.4 mostra um exemplo de Workflow modelado pela WF-Net. O exemplo pode ser facilmente transformado em uma rede de Petri comum, conhecendo-se a semântica de cada transição.

A WF-Net define anotações que são associadas às tarefas para indicar o *gatilho* que dispara a sua execução. Uma transição pode disparar apenas quando a condição do gatilho é satisfeita. Três tipos de gatilho são representados: 1) iniciativa de um recurso; 2) ocorrência de um evento externo; 3) sinal de tempo gerado por um clock. A Fig. 5.5 apresenta estas notações. Seu papel no modelo do Workflow é apenas informativo, não havendo impacto no modelo em rede de Petri subjacente.

A WF-Net pode ser utilizada para a verificação de corretude do Workflow através da análise do seu grafo de alcançabilidade. Alguns erros que podem ser encontrados pela análise do modelo são:

- Tarefas sem condição de entrada – Não está especificada a condição necessária

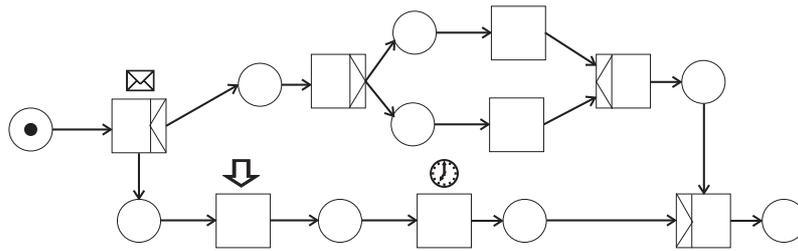


Figura 5.4: Exemplo de modelo WF-Net

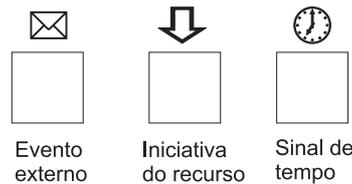


Figura 5.5: Notação para representação de gatilhos

para a execução da tarefa;

- Tarefas sem condição de saída – Não têm influência no processamento do *Case*;
- Tarefas mortas – O sistema nunca alcança um estado no qual a tarefa pode ser executada;
- *Deadlock* – O processamento do *Case* é bloqueado, nunca ocorrendo uma condição que permite a sua continuação;
- *Livelock* – O sistema entra em um ciclo no qual a condição de saída nunca irá ocorrer;
- Atividades ainda a serem executadas após o *Case* ter alcançado o ponto final;
- *Tokens* permanecem no sistema após a conclusão do processamento do *Case*.

Van der Aalst define as condições mínimas necessárias para um Workflow estar correto através da propriedade *Soundness* [AH02], definida a seguir.

Definição 5.1 (Soundness) *Um processo é considerado logicamente correto (Sound) se ele não contém nenhuma tarefa desnecessária e se todo Case iniciado pelo processo é totalmente concluído em algum momento, não restando nenhuma referência a ele (nenhum token remanescente) no sistema.*

Uma WF-Net atende aos requisitos da propriedade *Soundness* quando satisfaz as seguintes condições:

1. Para cada *token* colocado no lugar *Start*, exatamente um único *token* alcança o lugar *End* em algum momento futuro;
2. Quando um *token* é colocado no lugar *End*, todos os outros lugares estão vazios;
3. Para toda tarefa, é possível sair do estado inicial para um estado em que esta tarefa possa ser executada.

Para verificar a propriedade *Soundness*, van der Aalst descreve duas técnicas. Na primeira delas, os lugares *End* e *Start* são conectados por uma transição, criando uma rede cíclica. A condição de *Soundness* no processo corresponde às propriedades *liveness* e *boundedness* desta rede, que podem ser analisadas automaticamente com algoritmos eficientes.

A segunda técnica pode ser realizada manualmente e consiste em aplicar derivações em um modelo básico, o qual se sabe ser *Sound*, garantindo em cada derivação que a rede continua respeitando esta condição, de forma que, ao final, se consiga derivar o processo desejado por completo. As derivações são realizadas substituindo-se uma tarefa única por uma construção mais complexa a cada passo, dentre as construções básicas oferecidas (seqüência, *OR-Split/Join*, *AND-Split/Join* e iteração).

Uma variação da WF-Net utiliza redes de Petri coloridas (CPN) para realizar simulações para estimativa de desempenho [AH02]. Nesta variação, múltiplos *Cases* chegam para ser processados pelo Workflow. Os *tokens* recebem um identificador para indicar o *Case* a que pertencem. É considerado que cada atividade é executada por um único recurso. Esta variação não é definida formalmente pelo autor.

5.5.2 Stochastic Workflow Net

Tendo como base as idéias propostas por van der Aalst, um outro pesquisador, Hajo Reijers, apresentou em sua tese de doutorado um modelo para avaliação de desempenho de Workflow chamado Stochastic Workflow Net (SWN) [Rei02].

O modelo de Reijers utiliza as estruturas da WF-Net e acrescenta informações de tempo na forma de variáveis aleatórias discretas. Isto possibilita o estudo do Workflow na forma de um processo estocástico de tempo discreto.

Uma das principais características da SWN é a possibilidade de representar distribuições de probabilidade gerais para os intervalos entre chegadas e tempos de serviço das entidades do sistema e apresentar soluções que podem ser calculadas analiticamente. Isto permite calcular a distribuição do tempo de resposta do sistema, uma métrica de extrema importância em avaliação de desempenho.

Reijers erroneamente corresponde o seu modelo a uma cadeia de Markov de tempo discreto [Rei02]. Esta correspondência não é válida, pois apenas a distribuição de probabilidade geométrica respeita a propriedade markoviana, necessária para que um processo estocástico seja considerado uma cadeia de Markov. Uma vez que seu modelo admite distribuições de tempo gerais, a propriedade markoviana não é satisfeita.

Reijers aplica um processo de síntese, na direção inversa à derivação definida por van der Aalst, no qual uma estrutura é simplificada na forma de uma única transição, cuja distribuição de probabilidade do tempo é calculada a partir dos tempos das transições que foram compostas. A síntese de estruturas iterativas é mais complexa. Dois tipos de iteração são considerados por ele: 1) iterações com probabilidade de saída constante; 2) iterações com número fixo de execuções. Reijers fornece um algoritmo que admite algumas simplificações para permitir a obtenção de um tempo de resposta para esta estrutura.

Uma limitação do modelo SWN é que ele não é capaz de representar recursos (papéis e participantes). Sua representação corresponde à execução de uma única instância do processo em um ambiente com um número infinito de recursos. Isto impossibilita a avaliação de cenários mais práticos, em que há um número finito (e

muitas vezes reduzido) de recursos que são responsáveis pela execução de diversas instâncias de processo concorrentemente.

5.5.3 Resource-Extended Stochastic Workflow Net

Para oferecer uma solução para a avaliação de Workflow com número limitado de recursos, Reijers propôs uma extensão do seu modelo, a qual chamou de *Resource-Extended Stochastic Workflow Net*.

Este modelo atribui a cada atividade do Workflow um número finito de recursos e assume a execução de múltiplas instâncias de processo de forma concorrente. Desta forma, o sistema passa a apresentar filas de instâncias esperando para serem processadas. Estas filas causam um aumento no tempo de resposta do sistema devido ao tempo de espera. A rede de Petri é estendida pela utilização de *cores* para identificar os diferentes *Cases*. Desta forma, cada *token* possui um identificador que define o seu *Case* correspondente.

Reijers não apresenta uma forma de síntese semelhante ao modelo SWN que possa ser utilizado para obtenção da distribuição do tempo de resposta. Contudo, uma vez que o modelo admite distribuições gerais de tempo de serviço e intervalos de chegada, cada atividade neste modelo equivale a um modelo de fila $G/G/m$, onde m é o número de recursos disponíveis para a atividade. Para este tipo de fila não há soluções analíticas exatas, mas existem algumas soluções aproximadas que podem ser calculadas analiticamente [BGdMT98].

Uma limitação que pode ser identificada na *Resource-Extended SWN* é que ela não permite a representação de recursos compartilhados entre atividades. Normalmente, um recurso é responsável por executar diversas atividades ao longo do Workflow. Esta característica faz com que os tempos de execução das atividades sejam interdependentes, tornando a sua avaliação mais complexa. Tais fatores não são representáveis também utilizando teoria das filas.

5.5.4 Time Workflow Net

Um outro modelo que surgiu, baseado na idéia inicial da WF-Net, é chamado de *Time Workflow Net* (TWF-Net), criado por Ling e Schmidt [LS00]. Seu objetivo é permitir a associação de tempos a atividades, possibilitando análises de restrições de tempo do processo. Os tempos na TWF-Net são expressos na forma de intervalos no formato $[min, max]$, que são associadas às transições.

O conceito de *Soundness* é reformulado para considerar as restrições de tempo.

Os autores deste modelo permitem a representação de recursos e múltiplas instâncias no processo, mas de maneira *ad-hoc*, não apresentando uma definição formal para tal. Isto torna a definição do seu modelo incoerente, uma vez que é formalmente apresentado como a adição de rótulos de tempo a uma rede WF-Net – que não compartilha estas características.

JianQiang et al. apresentam uma rede com a mesma semântica, chamada de *Time Constraint Workflow Net* (TCWF-net) [LFZ04b]. O modelo de Ling e Schmidt, entretanto, é anterior.

5.5.5 Multidimension Workflow Net

No nosso conhecimento, o modelo que representa recursos de forma mais completa para avaliação de Workflow é a *Multidimension Workflow Net* (MWF-net) [LFZ04a].

A MWF-net consiste numa composição de diversas TWF-Net, acrescentada de informações sobre restrições de recursos. Os recursos são compartilhados entre as diversas TWF-Net que compõem o sistema.

A TWF-Net definida por JianQiang et al. é diferente daquela apresentada por Ling e Schmidt [LS00]. Ela apresenta o tempo na forma de variáveis aleatórias exponencialmente distribuídas e admite a chegada de múltiplos *Cases*, seguindo um processo de Poisson. O modelo exige que cada TWF-Net corresponda a uma rede de Petri de *escolha livre*.

Cada TWF-Net é decomposta em um conjunto de sub-redes de escolha livre, que correspondem a um conjunto de possíveis caminhos de execução de cada processo. A partir deste conjunto, a carga de trabalho dos recursos é estimada. Para isto, são considerados os *throughputs* das transições que utilizam cada recurso (que podem ser calculados sabendo-se a taxa de chegada λ do sistema). É montada uma equação que considera estes *throughputs* e o número de recursos em cada papel para o cálculo do tempo médio de serviço fornecido por um recurso. Este tempo médio é utilizado para o cálculo de um limite inferior para o tempo de resposta do sistema. Para tanto, os tempos de espera em fila são ignorados, sendo considerados apenas os tempos de serviço estimados.

5.5.6 Yet Another Workflow Language

Com base nos Padrões de Workflow identificados e a partir da constatação de que nenhuma linguagem existente até então era capaz de representar todos eles diretamente, van der Aalst desenvolveu uma nova linguagem, chamada de *Yet Another Workflow Language* (YAWL) [AH03].

A YAWL é uma notação formal, com bases nos conceitos das redes de Petri, mas que estende a sua semântica. Seu objetivo é representar todos os padrões catalogados de forma direta e oferecendo ainda a possibilidade da realização de análises qualitativas.

Além da definição da linguagem, uma ferramenta de modelagem e um motor de execução também foram implementados para permitir a utilização deste modelo em ambientes reais [vdAADtH04].

Capítulo 6

Um Modelo para Avaliação de Desempenho de Workflow

Este capítulo apresenta os modelos propostos para representação e avaliação de desempenho de Workflow. As Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN) são aplicadas como modelo de representação.

O objetivo destes modelos é permitir a caracterização do comportamento do Workflow para que seja possível identificar problemas e encontrar oportunidades de melhoria. Uma vez que melhorias sejam idealizadas, o modelo pode ser utilizado para verificar se o sistema terá o comportamento esperado após a sua modificação. Desta forma, pode ser aplicado em projetos de BPI (*Business Process Improvement*) e BPR (*Business Process Redesign*) para avaliar a versão *ESTÁ (AS IS)* e *DEVERIA (SHOULD BE)* do Workflow.

Os conceitos fundamentais de Workflow são mapeados em estruturas básicas em GSPN e regras de composição são oferecidas para que processos complexos sejam modelados. Uma vez que estes conceitos são representados de formas diferentes nas diferentes notações existentes, optou-se por não utilizar uma notação ou linguagem de Workflow como base para criação dos modelos. Ao invés disso, os conceitos fundamentais é que são utilizados como ponto de partida para a representação do Workflow em GSPN.

Os processos modelados apresentam as seguintes características principais quanto à sua expressividade:

- Representam a execução de múltiplas instâncias do mesmo processo;
- Representam recursos agrupados em papéis que são responsáveis pela execução de uma ou mais atividades (recursos compartilhados);
- Diferencia *Work Items* e Instâncias de Atividade em execução;
- Assume que a chegada de *Cases* corresponde a um processo de Poisson;
- Assume que os tempos de serviço são variáveis aleatórias exponenciais.

Apesar de o modelo assumir que os tempos são exponencialmente distribuídos, é possível aproximar qualquer distribuição de probabilidade cuja transformada de Laplace é racional através da combinação de variáveis exponenciais. Os métodos para realizar esta aproximação em uma GSPN são bem conhecidos [BCB89, MBea95]

e podem ser aplicados no modelo proposto para aumentar a sua representatividade, sem perda de validade dos resultados aqui apresentados. Esta opção não será abordada neste trabalho.

O modelo permite a obtenção das seguintes informações sobre o Workflow:

- Verificação de corretude (*Soundness*);
- Número mínimo de recursos necessários em cada papel;
- Número de Instâncias de Atividade em execução;
- Número de *Work Items* em cada *Worklist*;
- Número de recursos disponíveis em cada papel;
- Tempo médio de processamento de um *Case* (tempo de resposta).

6.1 Modelos Básicos

A seguir, são descritas as estruturas básicas que modelam o Workflow e as expressões para o cálculo de métricas sobre estas estruturas. Na seção seguinte, serão apresentadas as regras de composição que criam o controle de fluxo no sistema.

Definição 6.1 (Conjunto Papéis) *O Conjunto Papéis, denotado por \mathcal{P} , contém os papéis que existem no Workflow. É definido como um conjunto $\mathcal{P} = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$, onde cada R_i é um papel.*

Definição 6.2 (Instância de Processo) *Instâncias do processo sendo executadas pelo sistema de Workflow são representadas por tokens na GSPN.*

A estrutura fundamental no modelo de Workflow proposto é o Modelo de Atividade. Este é o modelo que representa a execução de uma atividade por parte de um recurso. Utilizamos uma linguagem de rótulos para identificar cada atividade e papel, facilitando o seu reconhecimento na rede. Assim, uma Atividade é representada pela notação $A_i(R_k, d_i)$, onde i é um índice que identifica a Atividade e k um índice que identifica o papel que é responsável por sua execução.

Definição 6.3 (Modelo de Atividade) *Um Modelo de Atividade é denotado por $A_i(R_k, d_i)$, onde:*

1. $R_k \in \mathcal{P}$ é o papel responsável pela execução da atividade;
2. $d_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade.

e corresponde a uma GSPN, $A_i(R_k, d_i) = (P_i, T_i, \Pi_i, I_i, O_i, H_i, M_0^i, \omega_i)$, que é definida da seguinte forma:

1. $P_i = \{R_k, W_i, S_i\}$, onde:
 - R_k é um lugar que representa o papel R_k , responsável pela execução;
 - W_i é um lugar que conterà os *Work Items* desta Atividade, chamado de *Worklist place*;

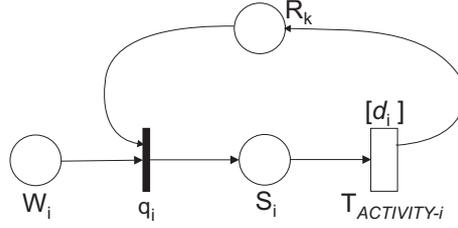


Figura 6.1: Modelo de Atividade em GSPN

- S_i é um lugar que conterá as Instâncias de Atividade, chamado de Service place.
2. $T_i = \{q_i, T_{ACTIVITY-i}\}$, onde:
 - q_i é uma transição imediata, com $\omega_i(q_i) = 1$ e $\Pi_i(q_i) = 1$;
 - $T_{ACTIVITY-i}$ é uma transição temporizada com tempo médio igual ao valor d_i e semântica de infinitos servidores (infinite server).
 3. e I_i, O_i , são tais que:
 - (a) a pré-condição $\bullet q_i = \{W_i, R_k\}$ e a pós-condição $q_i \bullet = \{S_i\}$;
 - (b) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-i} \bullet = \{R_k\}$.

Omitimos os parâmetros R_k e d_i quando estes não são relevantes para o contexto, utilizando a notação simplificada “ A_i ” para nos referirmos à Atividade “ $A_i(R_k, d_i)$ ”.

A Fig. 6.1 apresenta a GSPN correspondente ao modelo de Atividade.

Este modelo é indicado para a representação de Atividades executadas por recursos humanos ou para Atividades automatizadas que necessitam de algum recurso físico para serem executadas.

Atividades automatizadas, em geral, apresentam um tempo de execução muito pequeno e podem ser ignoradas. Entretanto, quando se julga que o seu tempo de execução é relevante para a avaliação, pode-se utilizar o Modelo de Atividade Automatizada.

Definição 6.4 (Modelo de Atividade Automatizada) *Um Modelo de Atividade Automatizada, denotado por $A_i^a(d_i)$, onde d_i é o seu tempo médio de execução, corresponde a uma GSPN contendo:*

1. um lugar S_i , chamado de Service place;
2. uma transição temporizada infinite-server $T_{ACTIVITY-i}$ com tempo médio d_i , pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e pós-condição vazia.

O modelo da Atividade automatizada é simplesmente um tempo de retardo adicionado ao processo, mas sem a ocorrência de filas, devido à sua semântica *infinite-server*.

Os modelos de Atividade são compostos entre si aplicando-se regras de composição, que serão definidas nas seções posteriores. Através desta composição são criados Sub-processos.

O Sub-processo é uma GSPN que atende às restrições apresentadas na Def. 6.5. Nós denotamos por $SProc$ o conjunto de todas as GSPN que formam um Sub-processo válido.

Definição 6.5 (Sub-processo) *Um Sub-processo é uma GSPN*

$U = (P_U, T_U, \Pi_U, I_U, O_U, H_U, M_0^U, \omega_U)$, tal que

1. existe um único lugar $Sp \in P_U$, tal que $\bullet Sp = \emptyset$, chamado de Lugar Inicial;
2. existe um conjunto não vazio de transições $Dt \subseteq T_U$, tais que $\forall t \in Dt : t^\bullet = \emptyset$, chamadas de Transições de Partida;
3. para cada token que chega ao Lugar Inicial Sp , exatamente um token parte do Sub-processo, através de qualquer uma das Transições de Partida de Dt .

Quando é realizada a composição de Atividades e Sub-processos, as GSPNs de cada modelo individual são reunidas em uma única GSPN. A Def. 6.6 apresenta uma condição que deve ser verdadeira para todas as composições.

Definição 6.6 (Equivalência de Papéis) *Seja $R_k \in \mathcal{P}$ um papel e $A_1(R_k, d_1)$, $A_2(R_k, d_2)$ duas Atividades quaisquer. Se estas Atividades são compostas, formando uma única GSPN, o lugar R_k que corresponde ao papel em cada modelo é único na GSPN resultante.*

A seguir, são definidas algumas operações e funções auxiliares que serão utilizadas ao longo deste capítulo.

Definição 6.7 (União de GSPN) *A operação de união de duas GSPN neste modelo pode ser definida como*

$$\cup_{GSPN} : GSPN \times GSPN \rightarrow GSPN$$

$G_1 \cup_{GSPN} G_2 = G_3$, onde:

1. $G_1 = (P_1, T_1, \Pi_1, I_1, O_1, H_1, M_0^1, \omega_1)$;
2. $G_2 = (P_2, T_2, \Pi_2, I_2, O_2, H_2, M_0^2, \omega_2)$;
3. $G_3 = (P_3, T_3, \Pi_3, I_3, O_3, H_3, M_0^3, \omega_3)$;
4. $P_3 = P_1 \cup P_2$;
5. $T_3 = T_1 \cup T_2$;
- 6.

$$I_3(p, t) = \begin{cases} I_1(p, t) & \text{if } p \in P_1 \text{ and } t \in T_1 \\ I_2(p, t) & \text{if } p \in P_2 \text{ and } t \in T_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

7.

$$O_3(p, t) = \begin{cases} O_1(p, t) & \text{if } p \in P_1 \text{ and } t \in T_1 \\ O_2(p, t) & \text{if } p \in P_2 \text{ and } t \in T_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

8.

$$H_3(p, t) = \begin{cases} H_1(p, t) & \text{if } p \in P_1 \text{ and } t \in T_1 \\ H_2(p, t) & \text{if } p \in P_2 \text{ and } t \in T_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

9.

$$\omega_3(t) = \begin{cases} \omega_1(t) & \text{if } t \in T_1 \\ \omega_2(t) & \text{if } t \in T_2 \end{cases}$$

10.

$$\Pi_3(t) = \begin{cases} \Pi_1(t) & \text{if } t \in T_1 \\ \Pi_2(t) & \text{if } t \in T_2 \end{cases}$$

11.

$$M_0^3(p) = \begin{cases} M_0^1(p) & \text{if } p \in P_1 \\ M_0^2(p) & \text{if } p \in P_2 \end{cases}$$

Quando a união de GSPNs é realizada, dois elementos com o mesmo nome presentes nas redes originais são fundidos na GSPN resultante. Por exemplo, se G_1 contém um lugar chamado P e G_2 também contém um lugar P , a união fará com que estes lugares sejam considerados o mesmo único lugar na GSPN resultante. Este comportamento é coerente com o operador matemático da união e é desejado em nosso modelo porque queremos que lugares representando papéis iguais sejam fundidos quando as Atividades são compostas. A Def. 6.6 torna esta propriedade explícita.

Definição 6.8 (Função Lugar Inicial) *Para um Sub-processo*

$U = (P_U, T_U, \Pi_U, I_U, O_U, H_U, M_0^U, \omega_U)$, denotamos por $Start(U)$ o lugar $Sp \in P_U$, que satisfaz às condições para ser o Lugar Inicial de U .

Definição 6.9 (Função Transições de Partida) *Para um Sub-processo*

$U = (P_U, T_U, \Pi_U, I_U, O_U, H_U, M_0^U, \omega_U)$, denotamos por $End(U)$ o conjunto de transições $Dt \subseteq T_U$, que satisfazem às condições para serem Transições de Partida de U .

O modelo mais simples de Sub-processo é uma Atividade. Toda Atividade A_i é um Sub-processo, tal que:

1. W_i é o Lugar Inicial;
2. $\{T_{ACTIVITY-i}\}$ é o conjunto de Transições de Partida.

O Modelo de Atividade Automatizada possui a mesma correspondência a um Sub-processo, diferindo apenas quanto ao lugar inicial, que é dado pelo lugar S_i (*Service Place*).

O Modelo de Sub-processo é usado para criar a Definição do Processo de um Workflow. Contudo, para possibilitar a avaliação de desempenho, é necessário que este Sub-processo seja inserido em um sistema, no qual também são representados os clientes e os recursos. Denominamos este sistema de *Sistema de Workflow*.

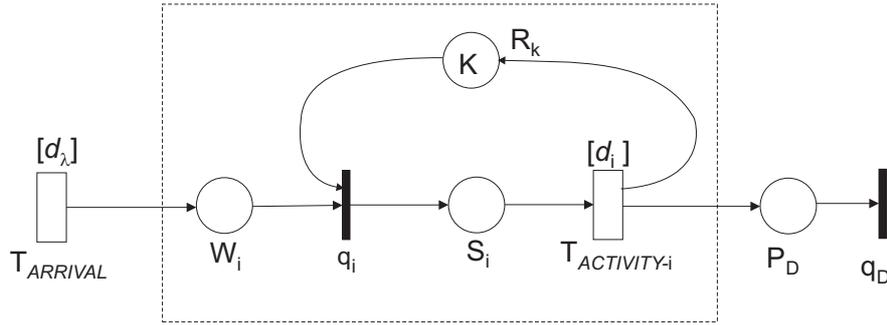


Figura 6.2: Sistema de Workflow mais simples

Definição 6.10 (Sistema de Workflow) Um Sistema de Workflow é denotado pela tupla $Wf = (\lambda, \mathcal{P}, U, Emp)$, onde:

1. $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$ é a taxa de chegada, que indica a taxa com que cases chegam ao sistema;
2. \mathcal{P} é o Conjunto Papéis;
3. $U \in SProc$ é um Sub-processo que corresponde à Definição do Processo;
4. $Emp : \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{N}_+$ é uma função Emprego, que atribui um número de recursos a cada papel.

A GSPN associada ao Sistema de Workflow é criada adicionando-se os seguintes elementos à rede U :

1. Uma transição temporizada $T_{ARRIVAL}$ com delay $d = 1/\lambda$, pré-condição vazia e pós-condição dada por $T_{ARRIVAL}^\bullet = \{Start(U)\}$;
2. Um lugar P_D com pré-condição $\bullet P_D = End(U)$;
3. Uma transição imediata q_D com pré-condição $\bullet q_D = \{P_D\}$ e pós-condição vazia;
4. Uma marcação inicial M_0 tal que $M_0(R_j) = Emp(r_j), \forall r_j \in \mathcal{P}$, onde $R_j \in P_U$ é o lugar que representa o papel $r_j \in \mathcal{P}$.

A Fig. 6.2 apresenta o modelo mais simples de Sistema de Workflow. O Sub-processo modelado contém apenas uma Atividade e está demarcado pelo quadrado pontilhado. Observe que o lugar R recebe uma marcação inicial K , que corresponde ao valor de $Emp(R)$.

O lugar P_D e a transição q_D formam juntos um Sub-processo especial, chamado de *Case Departure Point*. Este Sub-processo pode ser usado como alvo em composições que tenham como destino o final da execução do processo.

6.1.1 Métricas Para os Modelos Básicos

As métricas a seguir podem ser avaliadas para os modelos básicos.

Definição 6.11 (Número Mínimo de Recursos em um Papel) *Seja R_k um papel com K recursos e participando em um conjunto de atividades $A_1(R_k, d_1), A_2(R_k, d_2), \dots, A_N(R_k, d_N)$, o estado estacionário para este Workflow existe apenas se é verdadeira a condição:*

$$K > \sum_{i=1}^N \lambda_i d_i ,$$

onde λ_i é a taxa de chegada de Work Items em A_i .

Observe-se que as taxas de chegada em cada Atividade poderão ser diferentes, dependendo do fluxo de *Cases* dentro do processo.

Definição 6.12 (Número Esperado de Instâncias de Atividade) *Para uma Atividade com tempo médio d_i e taxa de chegada de Work Items λ_i , provida do número suficiente de recursos, o número médio de instâncias da Atividade no estado de equilíbrio é:*

$$E(S_i) = \lambda_i d_i .$$

Definição 6.13 (Número Esperado de Recursos Disponíveis) *Para um papel R_k com K recursos e participando das Atividades A_1, \dots, A_N , o número médio de recursos disponíveis é calculado por:*

$$E(R_k) = K - \sum_{i=1}^N E(S_i) ,$$

onde $E(S_i)$ é o número esperado de instâncias de A_i .

Definição 6.14 (Número Esperado de Work Items) *Para uma Atividade A_i , o número médio de Work Items desta Atividade é igual à esperança da marcação do lugar W_i .*

Definição 6.15 (Número Esperado de Cases) *Para uma Atividade A_i , o número médio de Cases executando esta atividade é calculado por*

$$E(n_i) = E(W_i) + E(S_i) .$$

Definição 6.16 (Tempo Médio de Resposta da Atividade) *Seja A_i uma Atividade com taxa de chegada de Work Items λ_i e tempo de serviço d_i , o tempo médio de resposta é dado por:*

$$E(\tau_i) = \frac{E(n_i)}{\lambda_i} ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Cases de A_i .

A Tabela 6.1 resume as métricas definidas para os modelos básicos.

Tabela 6.1: Métricas para os modelos básicos

Métrica	Expressão
Número Mínimo de Recursos	$K > \sum_{i=1}^N \lambda_i d_i$
Núm. Esperado de Inst. de Atividade	$E(S) = \lambda d$
Núm. Esperado de Recursos Disponíveis	$E(R) = K - \sum_{i=1}^N E(S_i)$
Número Esperado de <i>Work Items</i>	$E(W) = \text{esperança da marcação de } W$
Núm. Esperado de <i>Cases</i> na Atividade	$E(n) = E(W) + E(S)$
Tempo Médio de Resposta	$E(\tau) = E(n)/\lambda$

6.2 Composição de Sub-processos

A criação de Sub-processos complexos é realizada através da composição de Atividades e Sub-processos mais simples. As relações de ordem de execução das Atividades e Sub-processos são definidas pela regra de composição que é aplicada. A seguir, são apresentados um conjunto de operadores de composição de Sub-processos.

A composição de Sub-processos é realizada pela união de GSPNs e adição de elementos auxiliares para a conexão dos operandos. Como simplificação, foram atribuídos nomes ilustrativos a estes elementos auxiliares (lugares e transições). Entretanto, deve-se notar que, durante a construção de um modelo, estes elementos devem receber nomes únicos, evitando que existam elementos homônimos, os quais seriam fundidos pela operação de união.

6.2.1 Seqüência

Este operador une dois Sub-processos, U_1 e U_2 , em uma relação de seqüência (ou causa e efeito). O modelo consiste em adicionar um arco ligando cada transição de partida do processo U_1 ao lugar inicial de U_2 . Este operador é ilustrado na Fig. 6.3.

Definição 6.17 (Operador Seqüência – SEQ)

$$SEQ : SProc \times SProc \rightarrow SProc$$

$$SEQ(U_1, U_2) = U_R, \text{ onde:}$$

$$U_R = U_1 \cup U_2, \text{ acrescida de um arco, de tal forma que:}$$

1. $Start(U_R) = Start(U_1)$;
2. $End(U_R) = End(U_2)$;
3. $\bullet Start(U_2) = End(U_1)$.

Como simplificação de notação, pode-se utilizar uma forma geral do operador, $SEQ(U_1, U_2, \dots, U_N)$ (múltiplos argumentos), como abreviação à composição $SEQ(U_1, SEQ(U_2, \dots, SEQ(U_{N-1}, U_N)))$, sem diferenças para o modelo resultante.

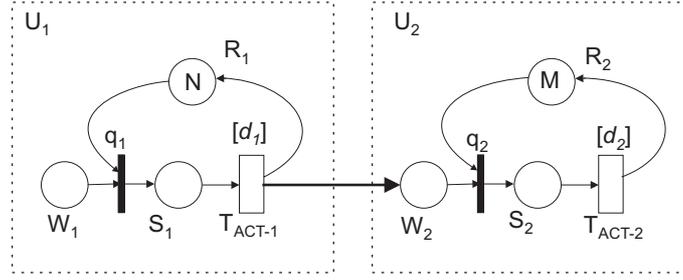


Figura 6.3: Composição em seqüência (SEQ)

6.2.2 Métricas Para a Seqüência

As seguintes métricas podem ser obtidas para o Sub-processo sequencial.

Definição 6.18 (Taxa de Chegada Interna na Seqüência) *Seja $SEQ(U_1, U_2)$ um Sub-processo com taxa de chegada de Cases igual a λ , as taxas de chegada λ_1, λ_2 em cada um dos seus componentes U_1, U_2 , respectivamente, é dada por:*

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

Definição 6.19 (Número Esperado de Cases na Seqüência) *Seja $SEQ(U_1, U_2)$ um Sub-processo, o seu número médio de Cases é calculado por:*

$$E(n_{SEQ}) = E(n_1) + E(n_2) ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo S_i .

Definição 6.20 (Tempo Médio na Seqüência) *Seja $SEQ(U_1, U_2)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:*

$$E(\tau_{SEQ}) = \frac{E(n_{SEQ})}{\lambda} ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

6.2.3 Caminho Alternativo (XOR)

Este operador cria um Sub-processo que é composto por N outros Sub-processos (U_1, \dots, U_N) , que são executados alternativamente. Cada Case que chega é encaminhado a um dos Sub-processos, de acordo com uma distribuição de probabilidade Pr , a qual atribui uma probabilidade $Pr(U_i)$ à escolha de cada um dos Sub-processos (caminhos).

Esta operação é modelada pela adição de um lugar P_{XOR} , que faz o papel de lugar inicial do Sub-processo, e um conjunto de transições imediatas qx_1, \dots, qx_N , que retiram um *token* de P_{XOR} e o colocam no lugar inicial do Sub-processo U_1, \dots, U_N , respectivamente. A cada uma das transições é atribuído um peso igual à probabilidade Pr do Sub-processo em questão ser escolhido.

O modelo desta operação é apresentado na Fig. 6.4.

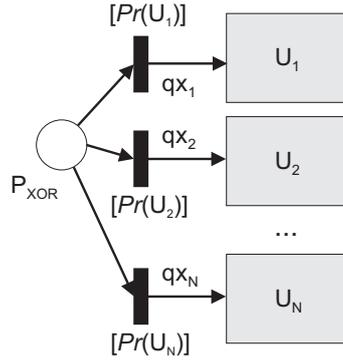


Figura 6.4: Composição de caminhos alternativos (XOR)

Definição 6.21 (Operador Caminho Alternativo – XOR) *Sejam U_1, U_2, \dots, U_N Sub-processos e Pr uma função de distribuição de probabilidade*

$$XOR : SProc \times \dots \times SProc \times (SProc \rightarrow \mathbb{R}[0; 1]) \rightarrow SProc$$

$XOR(U_1, U_2, \dots, U_N, Pr) = U_R$, onde:

1. *Seja G_{XOR} uma GSPN contendo um lugar P_{XOR} e transições imediatas qx_1, \dots, qx_N , com $P_{XOR}^\bullet = \{qx_i\}$, $i = 1, \dots, N$;*
2. $\omega(qx_i) = Pr(U_i)$, $i = 1, \dots, N$;
3. $U_R = U_1 \cup \dots \cup U_N \cup G_{XOR}$, *acrescida de arcos, de tal forma que:*
 - (a) $Start(U_R) = P_{XOR}$;
 - (b) $End(U_R) = End(U_1) \cup \dots \cup End(U_N)$;
 - (c) $^\bullet Start(U_i) = \{qx_i\}$, $i = 1, \dots, N$.

6.2.4 Métricas Para o Caminho Alternativo

As seguintes métricas podem ser obtidas para o Sub-processo Caminho Alternativo.

Definição 6.22 (Taxa de Chegada Interna no Caminho Alternativo) *Seja $XOR(U_1, U_2, \dots, U_N, Pr)$ um Sub-processo com taxa de chegada de Cases igual a λ , as taxas de chegada $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ em cada um dos seus componentes U_1, \dots, U_N , respectivamente, é dada por:*

$$\lambda_i = \lambda Pr(U_i), \quad i = 1, \dots, N .$$

Definição 6.23 (Número Esperado de Cases no Caminho Alternativo) *Seja $XOR(U_1, U_2, \dots, U_N, Pr)$ um Sub-processo, o seu número médio de Cases é calculado por:*

$$E(n_{XOR}) = \sum_{i=1}^N E(n_i) ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo U_i .

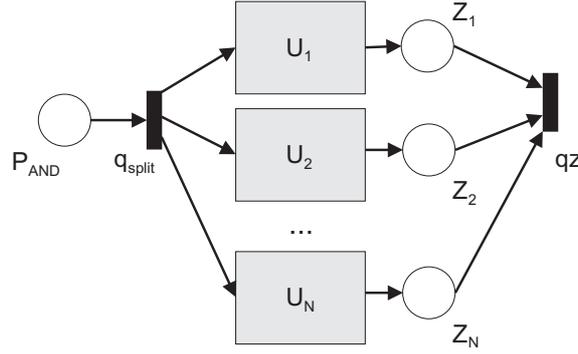


Figura 6.5: Composição em paralelo (AND)

Definição 6.24 (Tempo Médio no Caminho Alternativo) *Seja $XOR(U_1, U_2, \dots, U_N, Pr)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:*

$$E(\tau_{XOR}) = \frac{E(n_{XOR})}{\lambda},$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

6.2.5 Execução em Paralelo (AND)

Este operador cria um Sub-processo que consiste na execução paralela de N outros Sub-processos dos quais ele é composto. Cada Case que chega é enviado para ser processado simultaneamente por todos os Sub-processos internos. Os processos são sincronizados no ponto de saída da estrutura, permitindo que o Case saia do sistema apenas quando todos os Sub-processos forem concluídos.

Esta operação é modelada através da adição de uma estrutura inicial, responsável por realizar o *split* dos *tokens* que chegam, e uma estrutura de saída, responsável por realizar a sincronização e o *merge* dos *tokens*. O modelo é apresentado na Fig. 6.5.

Definição 6.25 (Operador Paralelismo – AND)

$$AND : SProc \times \dots \times SProc \times \rightarrow SProc$$

$AND(U_1, U_2, \dots, U_N) = U_R$, onde:

1. Seja G_{AND} uma GSPN contendo o lugar P_{AND} , uma transição imediata q_{split} , com $P_{AND}^\bullet = \{q_{split}\}$, um conjunto de lugares $\{Z_1, \dots, Z_N\}$ e uma transição imediata qz , tal que $qz^\bullet = \{Z_1, \dots, Z_N\}$;
2. $U_R = U_1 \cup \dots \cup U_N \cup G_{AND}$, acrescida de arcos, de tal forma que:
 - (a) $Start(U_R) = P_{AND}$;
 - (b) $End(U_R) = \{qz\}$;
 - (c) $Start(U_i) = q_{split}$, $i = 1, \dots, N$;
 - (d) $Z_i = End(U_i)$, $i = 1, \dots, N$.

6.2.6 Métricas Para a Execução em Paralelo

As seguintes métricas podem ser obtidas para o Sub-processo Execução em Paralelo.

Definição 6.26 (Taxa de Chegada Interna na Execução em Paralelo) *Seja $AND(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo com taxa de chegada de Cases igual a λ , as taxas de chegada $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ em cada um dos seus componentes U_1, \dots, U_N , respectivamente, é dada por:*

$$\lambda_i = \lambda, \quad i = 1, \dots, N .$$

Definição 6.27 (Número Esperado de Cases na Execução em Paralelo) *Seja $AND(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo, o seu número médio de Cases é calculado por:*

$$E(n_{PAR}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[E(n_i) + E(Z_i) \right] ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo U_i e $E(Z_i)$ é a esperança da marcação do lugar Z_i .

Definição 6.28 (Tempo Médio para Sincronização na Execução em Paralelo) *Seja $AND(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece aguardando por sincronização no Sub-processo é dado por:*

$$E(\zeta_{PAR}) = \frac{1}{N\lambda} \sum_{i=1}^N E(Z_i) ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases e $E(Z_i)$ é a esperança da marcação do lugar Z_i .

Definição 6.29 (Tempo Médio na Execução em Paralelo) *Seja $AND(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:*

$$E(\tau_{PAR}) = \frac{E(n_{PAR})}{\lambda} ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

6.2.7 Iteração

Uma iteração é um Sub-processo que é executado diversas vezes para processar o mesmo Case. Em um ou mais pontos da execução do Sub-processo, uma decisão é tomada sobre se o Case continua dentro da estrutura iterativa ou sai dela.

A estrutura iterativa neste modelo exige que haja um único ponto de início da iteração mas permite que existam diversos pontos de saída. Quando há apenas um ponto de saída, não havendo nenhuma Atividade no retorno entre o ponto de saída e o ponto de início, a estrutura é chamada de *Iteração Simples* e é criada pelo operador LOOP. Quando há múltiplos pontos de saída, a estrutura é chamada de *Iteração em Grade*, sendo construída através do operador GRID-LOOP.

A Fig. 6.6 mostra o modelo da Iteração Simples e a Fig. 6.7 mostra o modelo da Iteração em Grade para o caso em que há dois pontos de saída. Observe que a Iteração Simples é criada a partir de um único Sub-processo, enquanto a Iteração

em Grade tem uma composição mais complexa. Deve-se notar que o Sub-processo criado pela Iteração em Grade contém não apenas os elementos que fazem parte do ciclo iterativo, como também todos os caminhos de saída (ver Fig. 6.7). Isto foi necessário para garantir que a corretude da rede seja mantida e para manter a uniformidade no formato das operações apresentadas. Desta forma, é exigido que cada ponto de saída tenha um Sub-processo como destino.

Para cada ponto de saída da iteração, uma probabilidade de saída é atribuída. Considera-se neste modelo que a probabilidade de um *Case* sair do laço iterativo é constante, independente do número de vezes que a iteração tenha sido executada.

O modelo da operação LOOP é criado adicionando-se uma estrutura de decisão ao final do Sub-processo, onde duas transições imediatas são responsáveis pela divisão do fluxo. Uma delas corresponde à transição de partida do LOOP, enquanto a outra é responsável por fazer o *token* retornar ao lugar inicial. Este modelo é apresentado na Fig. 6.6.

Definição 6.30 (Operador Iteração Simples – LOOP) *Seja U_1 um Sub-processo e θ a probabilidade de saída do ciclo*

$$LOOP : SProc \times \mathbb{R}[0; 1] \rightarrow SProc$$

$LOOP(U_1, \theta) = S_R$, where:

1. *Seja G_{LOOP} uma GSPN formada por um lugar PL e duas transições imediatas q_{back} e q_{out} , tais que $PL^\bullet = \{q_{back}, q_{out}\}$;*
2. $\omega(q_{out}) = \theta$;
3. $\omega(q_{back}) = 1 - \theta$;
4. $U_R = U_1 \cup G^{LOOP}$, *acrescida de arcos, de maneira que:*
 - (a) $\forall t \in End(U_1), \quad t^\bullet = \{PL\}$;
 - (b) $q_{back}^\bullet = \{Start(U_1)\}$;
 - (c) $Start(U_R) = Start(U_1)$;
 - (d) $End(U_R) = \{q_{out}\}$.

O modelo da operação GRID-LOOP é criado pela adição de estruturas de decisão entre os processos que fazem parte do ciclo iterativo, representando cada um dos pontos de saída da iteração. Nestes pontos, duas transições imediatas fazem a divisão do fluxo, levando o *token* a um dos dois caminhos possíveis: ao próximo Sub-processo no ciclo ou ao Sub-processo de saída daquele ponto. O último Sub-processo é conectado ao lugar inicial, caracterizando o ciclo. Este modelo é apresentado na Fig. 6.7.

Definição 6.31 (Operador Iteração em Grade – GRID-LOOP) *Seja k o número de pontos de saída p_1, \dots, p_k ; UI_1, \dots, UI_{k+1} Sub-processos que fazem parte do ciclo de iteração e que são intercalados pelos pontos de saída e UO_1, \dots, UO_k os Sub-processos que são alvo de cada ponto de saída; e seja Pr um vetor de probabilidade que atribui a cada ponto p_i uma probabilidade de saída $Pr(p_i), i = 1, \dots, k$, o operador GRID-LOOP é definido como*

$$GRID - LOOP : \mathbb{P}(SProc) \times \mathbb{P}(SProc) \times (SProc \rightarrow \mathbb{R}[0; 1]) \rightarrow SProc$$

$GRID - LOOP(\{UI_1, \dots, UI_{k+1}\}, \{UO_1, \dots, UO_k\}, Pr) = S_R$, onde:

Definição 6.33 (Número Esperado de *Cases* na Iteração Simples) *Seja $LOOP(U_1, \theta)$ um Sub-processo, o seu número médio de Cases é calculado por:*

$$E(n_{LOOP}) = E(n_1) ,$$

onde $E(n_1)$ é o número médio de Cases no Sub-processo U_1 .

Definição 6.34 (Tempo Médio na Iteração Simples) *Seja $LOOP(U_1, \theta)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:*

$$E(\tau_{LOOP}) = \frac{E(n_{LOOP})}{\lambda} ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

O tempo médio na iteração conforme definido aqui leva em consideração o tempo necessário até que o *Case* saia da iteração, ou seja, o tempo total despendido pelo *Case* na soma de todas os seus ciclos de iteração.

Definição 6.35 (Taxa de Chegada Interna na Iteração em Grade) *Seja um Sub-processo $GRID - LOOP(\{UI_1, \dots, UI_{k+1}\}, \{UO_1, \dots, UO_k\}, Pr)$ com taxa de chegada de Cases igual a λ , a taxa de chegada λ^I_i em cada Sub-processo UI_i é dada por:*

$$\lambda^I_1 = \frac{\lambda}{\sum_{j=1}^k Pr(p_j)} ;$$

$$\lambda^I_i = \lambda^I_1 \prod_{v=1}^{i-1} (1 - Pr(p_v)) .$$

A taxa de chegada λ^O_i em cada Sub-processo UO_i é dada por:

$$\lambda^O_i = \lambda^I_1 \prod_{v=1}^i Pr(p_v) .$$

Definição 6.36 (Número Esperado de *Cases* na Iteração em Grade) *Seja um Sub-processo $GRID - LOOP(\{UI_1, \dots, UI_{k+1}\}, \{UO_1, \dots, UO_k\}, Pr)$, o seu número médio de Cases é dado por:*

$$E(n_{G-LOOP}) = \sum_{i=1}^{k+1} E(n^I_i) + \sum_{i=1}^k E(n^O_i) ,$$

onde $E(n^I_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo UI_i e $E(n^O_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo UO_i .

Muitas vezes estaremos mais interessados no número de *Cases* não da estrutura completa, mas apenas daqueles que estão iterando, ou seja, que ainda não saíram do ciclo iterativo. Este valor corresponde ao somatório:

$$E(n^I_{G-LOOP}) = \sum_{i=1}^{k+1} E(n^I_i) .$$

Definição 6.37 (Tempo Médio do Laço na Iteração em Grade) *Seja um Sub-processo*

GRID – LOOP($\{UI_1, \dots, UI_{k+1}\}, \{UO_1, \dots, UO_k\}, Pr$), *o tempo médio que um Case permanece no laço de iteração, antes de seguir por uma de suas saídas, é dado por:*

$$E(\tau^I_{G-LOOP}) = \frac{E(n^I_{G-LOOP})}{\lambda},$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

O tempo médio total na estrutura GRID-LOOP é dado pelo tempo de permanência no laço somado ao tempo do processo de saída, ponderado pela probabilidade de o *Case* seguir por cada saída.

Definição 6.38 (Tempo Médio na Iteração em Grade) *Seja um Sub-processo* *GRID – LOOP*($\{UI_1, \dots, UI_{k+1}\}, \{UO_1, \dots, UO_k\}, Pr$), *o tempo médio que um Case permanece na estrutura é dado por:*

$$E(\tau_{G-LOOP}) = E(\tau^I_{G-LOOP}) + \sum_{v=1}^k \prod_{i=1}^v Pr(p_i) E(\tau^O_i),$$

onde $E(\tau^O_i)$ é o tempo médio no Sub-processo UO_i , que deve ser calculado de acordo com as métricas do Sub-processo em questão.

6.2.9 Múltiplos Caminhos com Sincronização (OR)

Esta composição representa os padrões *Multi-Choice* (WCP6) e *Structured Synchronizing Merge* (WCP7). Corresponde a um ponto em que o *Case* pode seguir por um ou vários caminhos diferentes, executando em paralelo quando mais de um caminho é escolhido. A realização da junção é feita sincronizando instâncias que tomaram caminhos paralelos no ponto de divisão e deixando prosseguir instâncias que tomaram um único caminho.

Como simplificação, será apresentado o operador para o caso em que há dois Sub-processos U_1 e U_2 , e o *Case* poderá executar o primeiro, o segundo ou ambos. O modelo pode ser estendido para o caso geral em que há N caminhos sem dificuldades.

Atribui-se uma probabilidade α para o caso de o *Case* prosseguir apenas por U_1 , β para o caso de o *Case* seguir apenas por U_2 e π para a decisão por seguir os dois caminhos em paralelo.

O modelo desta operação é ilustrado na Fig. 6.8. Este modelo requer o uso de sete lugares auxiliares. Um lugar inicial P_{OR} representa o ponto de decisão, onde o *Case* que chega é transferido para um dos Sub-processos ou para ambos. Dois lugares, C_1 e C_2 , coletam os *tokens* que saem de U_1 e U_2 , respectivamente. Outros dois lugares, H_1 e H_2 , são utilizados para contar o número de *tokens* que são cópias de um mesmo *Case* e que estão dentro dos Sub-processos U_1 e U_2 , respectivamente. Por fim, os lugares Z_1 e Z_2 são utilizados para realizar a sincronização dos *tokens* que representam o mesmo *Case*, após estes saírem de cada Sub-processo.

Quando um *Case* chega ao lugar P_{OR} , transições imediatas são habilitadas, cada uma representando uma das três possíveis decisões. Caso o Sub-processo U_1 seja escolhido, o *token* é retirado de P_{OR} e enviado para este Sub-processo. Comportamento análogo ocorre quando o Sub-processo U_2 é escolhido. Caso a escolha realizada seja

por seguir por ambos os caminhos em paralelo, o *token* é retirado de P_{OR} e um *token* é enviado para cada um dos Sub-processos. Os lugares H_1 e H_2 também recebem, cada um, um *token*, indicando que há dois *tokens* representando um mesmo *Case*, um deles em U_1 e outro em U_2 .

Uma vez que um *token* saia de um dos Sub-processos, digamos, U_1 , o *token* em H_1 é retirado e um *token* é colocado em Z_1 , onde irá aguardar pela sincronização com o *token* que virá de U_2 .

Caso o *Case* tenha seguido por apenas um dos caminhos, nenhum *token* é colocado em H_1 . Ao sair do Sub-processo, o *token* é imediatamente levado para fora da estrutura.

Definição 6.39 (Operador Múltiplos Caminhos com Sincronização – OR)

Sejam U_1, U_2 dois Sub-process

$$OR : SProc \times SProc \times \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+ \rightarrow SProc$$

$OR(U_1, U_2, \alpha, \pi, \beta) = U_R$, onde:

1. Seja G_{OR} uma GSPN contendo um lugar P_{OR} e transições imediatas q_1, q_2, q_s , tais que

- (a) $P_{OR}^\bullet = \{q_1, q_2, q_s\}$;
- (b) $\omega(q_1) = \alpha$;
- (c) $\omega(q_2) = \beta$;
- (d) $\omega(q_s) = \pi$.

e lugares $C_1, C_2, H_1, H_2, Z_1, Z_2$ e transições imediatas $qbp_1, qsc_1, qbp_2, qsc_2, qz$ tais que:

- (a) $\bullet H_1 = \bullet H_2 = \{q_s\}$;
- (b) $C_i^\bullet = \{qbp_i, qsc_i\}$, $i = 1, 2$;
- (c) $H_i^\bullet = \{qsc_i\}$, $i = 1, 2$;
- (d) $H_i^\circ = \{qbp_i\}$, $i = 1, 2$;
- (e) $qsc_i^\bullet = \{Z_i\}$, $i = 1, 2$;
- (f) $\bullet qz = \{Z_1, Z_2\}$;
- (g) $\omega(qbp_1) = \alpha/(\alpha + \pi)$;
- (h) $\omega(qsc_1) = \pi/(\alpha + \pi)$;
- (i) $\omega(qbp_2) = \beta/(\beta + \pi)$;
- (j) $\omega(qsc_2) = \pi/(\beta + \pi)$.

2. $U_R = U_1 \cup U_2 \cup G_{XOR}$, acrescida de arcos de maneira que:

- (a) $\bullet Start(U_i) = \{q_i, q_s\}$, $i = 1, 2$;
- (b) $\bullet C_i = End(S_i)$, $i = 1, 2$;
- (c) $Start(U_R) = P_{OR}$;
- (d) $End(U_R) = \{qbp_1, qbp_2, qz\}$.

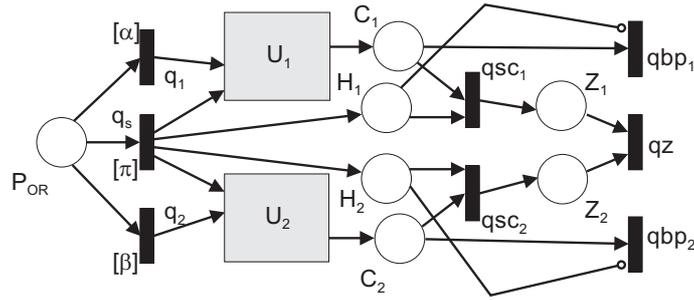


Figura 6.8: Composição de múltiplos caminhos com sincronização (OR)

6.2.10 Métricas Para Múltiplos Caminhos com Sincronização

As seguintes métricas podem ser obtidas para o Sub-processo Múltiplos Caminhos com Sincronização.

Definição 6.40 (Taxa de Chegada Interna no Múlt. Cam. com Sincronização)

Seja $OR(U_1, U_2, \alpha, \pi, \beta)$ um Sub-processo com taxa de chegada de Cases igual a λ , as taxas de chegada λ_1, λ_2 em cada um dos seus componentes U_1, U_2 , respectivamente, é dada por:

$$\lambda_1 = (\alpha + \pi)\lambda ;$$

$$\lambda_2 = (\beta + \pi)\lambda .$$

Observe que $\lambda_1 + \lambda_2 > \lambda$, mas a estrutura de sincronização garante que a taxa de saída do modelo será igual a λ .

A estrutura possui *tokens* que representam *Cases* individuais e também *tokens* que são réplicas de um mesmo *Case*. Ao se calcular o número médio de *Cases* nesta estrutura é necessário considerar esta característica. Para realizar este cálculo, some-se o conteúdo dos lugares Z_1 e Z_2 . Estes lugares representam *tokens* que já saíram dos Sub-processos e estão aguardando por sincronização. Divide-se este valor pela metade, pois há dois *tokens* para cada *Case*. Adiciona-se a este número o total de *tokens* em cada Sub-processo. O resultado contém todos os *tokens* que representam *Cases* individuais mas também contém os *tokens* que são réplicas e que ainda não saíram dos Sub-processos. Para retirar o número excedente de *tokens* desta soma, subtrai-se a quantidade de *Cases* que foram replicados. Esta quantidade pode ser obtida a partir dos lugares H_1 e H_2 .

Definição 6.41 (Número Esperado de Cases no M. C. com Sincronização)

Seja $OR(U_1, U_2, \alpha, \pi, \beta)$ um Sub-processo, o seu número médio de Cases é calculado por:

$$E(n_{OR}) = E(n_1) + E(n_2) + \frac{1}{2} [E(Z_1) + E(Z_2)] - \frac{1}{2} [E(H_1) + E(H_2)] ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Cases no Sub-processo U_i , $E(Z_i)$ é a esperança da marcação do lugar Z_i e $E(H_i)$ é a esperança da marcação do lugar H_i .

Definição 6.42 (Tempo Médio no Múltiplos Caminhos com Sincronização)

Seja $OR(U_1, U_2, \alpha, \pi, \beta)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:

$$E(\tau_{OR}) = \frac{E(n_{OR})}{\lambda} ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Cases.

6.2.11 Intercalamento

Esta composição representa a mesma situação encontrada pelo padrão *Interleaved Routing* (WCP40). Um conjunto de Atividades precisa ser executado de forma seqüencial, mas não é definido em que ordem elas devem ser executadas.

A regra de composição apresentada permite que não apenas Atividades mas qualquer Sub-processo seja incluído nesta estrutura.

O modelo consiste em gerar um *token* para cada Sub-processo, como se todos eles pudessem executar em paralelo, mas utilizar um *semáforo* (ou *mutex*) para garantir a exclusão mútua entre eles, de maneira que eles sejam executados seqüencialmente. Um lugar auxiliar é também adicionado ao final de cada Sub-processo, para fazer com que o *Case* parta da estrutura apenas quando todos os Sub-processos tiverem sido executados.

Quando um *token* chega ao lugar inicial P_{INTER} , o lugar P_{MUT} , que faz o papel de *mutex*, e os lugares H_1, \dots, H_N recebem um *token* cada. O lugar H_i indica que o Sub-processo S_i ainda está para ser executado. A execução do Sub-processo necessita de um *token* de P_{MUT} e outro do respectivo lugar H para ser iniciada.

Ao concluir a execução, o Sub-processo U_i coloca um *token* no lugar Z_i , que indica que este Sub-processo já foi executado e devolve o *token* para o lugar P_{MUT} . Quando todos os Sub-processos estão concluídos, a transição de partida qz é disparada, retirando os *tokens* dos lugares Z_1, \dots, Z_N e P_{MUT} .

Observe que cada *Case* que chega adiciona seu próprio *token* ao *mutex*, o que permite que seus Sub-processos sejam executados de forma independente de outros *Cases*. Apesar de isto aparentemente causar uma confusão entre *Cases*, já que os *tokens* não podem ser diferenciados entre si, esta confusão não ocorre, pois estamos preocupados com a quantidade de execuções de cada Sub-processo e não com quais dados estariam sendo processados por ele. A diferenciação se faz, portanto, irrelevante para as análises do nosso interesse. Isto foi confirmado experimentalmente.

O modelo é apresentado na Fig. 6.9.

Definição 6.43 (Operador Intercalamento – INTER) *Sejam U_1, U_2, \dots, U_N Sub-processos*

$$INTER : SProc \times \dots \times SProc \rightarrow SProc$$

$$INTER(U_1, U_2, \dots, U_N) = U_R, \text{ onde:}$$

1. *Seja G_{INTER} uma GSPN contendo lugares P_{MUT} ; P_{INTER} ; H_1, \dots, H_N ; e Z_1, \dots, Z_N ; e transições imediatas qs ; qz ; e qw_1, \dots, qw_N tais que:*

- (a) $P_{INTER}^\bullet = qs$;
- (b) $qs^\bullet = \{P_{MUT}, H_1, \dots, H_N\}$;
- (c) $H_i^\bullet = qw_i, \quad i = 1, \dots, N$;
- (d) $P_{MUT}^\bullet = \{qw_1, \dots, qw_N, qz\}$;
- (e) $\bullet qz = \{Z_1, \dots, Z_N\}$.

2. $U_R = U_1 \cup \dots \cup U_N \cup G_{INTER}$, *acrescida de arcos de maneira que:*

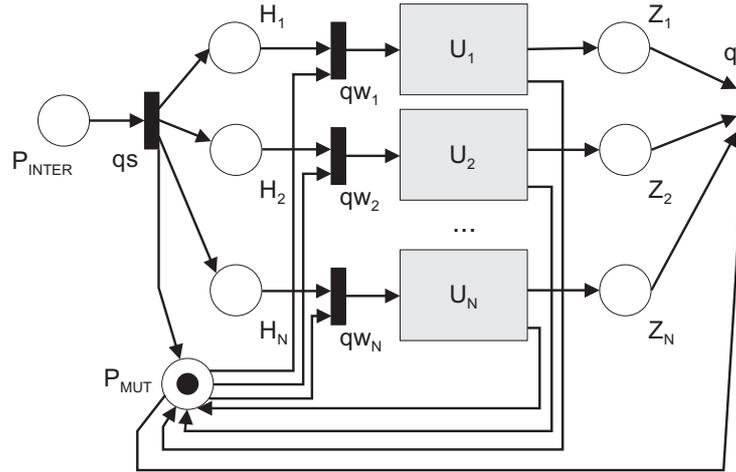


Figura 6.9: Composição de intercalamento (INTER)

- (a) $qw_i \bullet = \{Start(U_i)\}$, $i = 1, \dots, N$;
- (b) $\bullet Z_i = End(U_i)$, $i = 1, \dots, N$;
- (c) $\bullet P_{MUT} = \{qs\} \cup End(U_1) \cup \dots \cup End(U_N)$;
- (d) $Start(U_R) = P_{INTER}$;
- (e) $End(U_R) = \{qz\}$.

6.2.12 Métricas Para o Intercalamento

As seguintes métricas podem ser obtidas para o Sub-processo Intercalamento.

Definição 6.44 (Taxa de Chegada Interna no Intercalamento) *Seja $INTER(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo com taxa de chegada de Casos igual a λ , as taxas de chegada $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ em cada um dos seus componentes U_1, \dots, U_N , respectivamente, é dada por:*

$$\lambda_i = \lambda, \quad i = 1, \dots, N .$$

Definição 6.45 (Número Esperado de Casos no Intercalamento) *Seja $INTER(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo, o seu número médio de Casos é calculado por:*

$$E(n_{INTER}) = \sum_{i=1}^N E(n_i) ,$$

onde $E(n_i)$ é o número médio de Casos no Sub-processo U_i .

Definição 6.46 (Tempo Médio no Intercalamento) *Seja $INTER(U_1, U_2, \dots, U_N)$ um Sub-processo, o tempo médio que um Case permanece no Sub-processo é dado por:*

$$E(\tau_{INTER}) = \frac{E(n_{INTER})}{\lambda} ,$$

onde λ é a taxa de chegada de Casos.

6.2.13 Eliminação de Sub-processos

Em alguns casos, pode ser necessário eliminar um dos Sub-processos na composição. Por exemplo, pode-se ter um caminho alternativo em que um dos caminhos simplesmente leva até o final do Sub-processo, sem executar nada. Nestes casos, admite-se a eliminação do Sub-processo da seguinte forma:

Definição 6.47 (Eliminação de Sub-processo) *Seja U um Sub-processo com $St = Start(U)$ e $Dt = End(U)$, sua eliminação em um Workflow é realizada seguindo-se a regra:*

1. $\forall p : t \in Dt, O(t, p) > 0 \mid \bullet p = \bullet St;$
2. $\forall t \in \bullet St \mid O(t, St) = 0.$

6.3 Modelos Avançados de Atividade

Os modelos a seguir representam Atividades que possuem regras de execução mais complexas e que muitas vezes ocorrem em um Workflow. A partir do uso destes modelos em conjunto com as regras de composição já apresentadas, é possível representar um grande número de situações reais.

6.3.1 Atividade Cancelável

O modelo de Atividade apresentado anteriormente não permite que uma atividade seja cancelada. Contudo, existem diversas situações em que uma Atividade em andamento precisa ser cancelada, seja eliminando-se o *Work Item* da lista antes que um recurso inicie a sua execução ou interrompendo-se uma instância já em execução.

Neste modelo, abordaremos apenas o caso em que *Work Items* são eliminados, ou seja, a Atividade é cancelada antes que seja iniciada por um recurso. Esta situação pode se apresentar de duas formas:

- uma Atividade que perde *Work Items* de sua *Worklist* com o tempo. Isto representa a ocorrência de um cancelamento causado por um evento externo ao sistema, tal qual pela ação de um gerente;
- uma Atividade que perde *Work Items* sempre que recebe um Evento gerado após a execução de alguma outra Atividade no sistema.

Definiremos um modelo apenas para o primeiro caso. Para modelar esta situação, uma transição temporizada é ligada ao *Worklist Place* da Atividade. Sempre que um *token* chegar a este lugar e não houver um recurso disponível para processar o *Work Item*, a transição será habilitada (observe que, caso haja um recurso disponível, esta transição nem mesmo será habilitada, pois estará concorrendo com uma transição imediata, que tem prioridade). Caso o tempo em que o *Work Item* passa sem iniciar seu processo seja suficientemente grande, a transição irá disparar, causando a sua eliminação. O *Work Item* eliminado desta maneira é enviado para a próxima estrutura no fluxo do processo (não é possível cancelar o processo por completo através deste modelo, apenas Atividades em particular).

Este modelo é apresentado na Fig. 6.10.

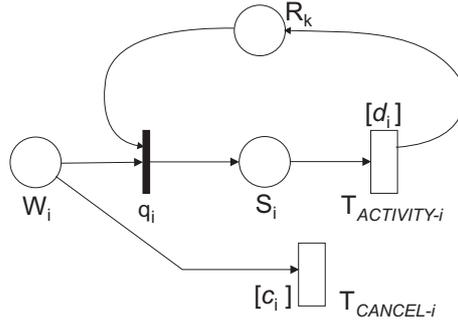


Figura 6.10: Modelo de Atividade Cancelável

Definição 6.48 (Modelo de Atividade Cancelável por Evento Externo) Um Modelo de Atividade Cancelável por Evento Externo é denotado por $A_i^c(R_k, d_i, c_i)$, onde:

1. $R_k \in \mathcal{P}$ é o papel responsável pela execução da atividade;
2. $d_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade;
3. $c_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio para o cancelamento de um Work Item caso nenhum recurso inicie sua execução.

e corresponde a uma GSPN, $A_i^c(R_k, d_i, c_i) = (P_c, T_c, \Pi_c, I_c, O_c, H_c, M_0^c, \omega_c)$, que é definida da seguinte forma:

1. $P_c = \{R_k, W_i, S_i\}$, onde:
 - R_k é um lugar correspondendo ao papel R_k ;
 - W_i é um lugar chamado de Worklist place;
 - S_i é um lugar chamado de Service place.
2. $T_c = \{q_i, T_{ACTIVITY-i}, T_{CANCEL-i}\}$, onde:
 - q_i é uma transição imediata;
 - $T_{ACTIVITY-i}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_i ;
 - $T_{CANCEL-i}$ é uma transição temporizada single-server com tempo médio c_i .
3. e I_c, O_c , são tais que:
 - (a) a pré-condição $\bullet q_i = \{W_i, R_k\}$ e a pós-condição $q_i \bullet = \{S_i\}$;
 - (b) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-i} \bullet = \{R_k\}$;
 - (c) a pré-condição $\bullet T_{CANCEL-i} = \{W_i\}$.

Uma Atividade Cancelável por Evento Externo A_i^c corresponde a um Sub-processo U , tal que $Start(U) = W_i$ e $End(U) = \{T_{ACTIVITY-i}, T_{CANCEL-i}\}$.

6.3.2 Múltiplas Instâncias sem Sincronização

Esta Atividade corresponde ao padrão *Multiple Instances without Synchronization* (WCP12). Consiste em uma Atividade que necessita da criação de múltiplas instâncias para o processamento de um *Case*, mas que não necessita de sincronização entre elas. Uma vez que uma das instâncias seja concluída, o processamento do *Case* prossegue para as atividades seguintes. As instâncias que ainda estão em execução são continuadas, mas são eliminadas quando concluídas, não seguindo processamento no Workflow.

O número de instâncias necessárias não é conhecido *a priori*. Desta forma, consideramos que este número é representado por uma variável aleatória discreta I . Assumimos que há um número limite k para a quantidade de instâncias a ser criada, de maneira que I assume valores de 1 a k . Considera-se que distribuição de probabilidade de I é conhecida.

O comportamento desta estrutura equivale a criar um número aleatório de *Work Items* para cada *Case* que chega. Assim que o primeiro *Work Item* é concluído, o *Case* prossegue no Workflow. Os outros *Work Items* são eliminados após a conclusão.

Este modelo é mostrado na Fig. 6.11. Um conjunto de transições imediatas é utilizado para representar a criação aleatória de *Work Items*. Cada transição qi_j possui peso igual a $P(I = j)$. Um arco de multiplicidade j liga esta transição ao *Worklist Place* da Atividade, adicionando j *tokens* a este lugar quando ela dispara. O lugar P_{count} é utilizado para armazenar o número de *Cases* que estão dentro da estrutura. Quando o primeiro *token* sai da Atividade, o *token* no lugar P_{count} é removido, significando que o *Case* saiu da estrutura. Quando P_{count} perde este *token*, a transição de partida qd deixa de ser disparável e a transição de eliminação qe passa a poder disparar. Os *tokens* remanescentes serão eliminados pelo disparo de qe assim que saírem da Atividade.

A semântica deste modelo corresponde a uma política que dá prioridade à execução de *Work Items* de *Cases* que ainda não foram processados. Ou seja, quando um novo *Case* chega, mesmo que *Work Items* remanescentes de um *Case* anterior ainda estejam na fila, é garantido que pelo menos um *Work Item* do novo *Case* será processado antes deles.

Definição 6.49 (Modelo de Atividade Múltiplas Instâncias sem Sincronização)

Um Modelo de Atividade com Múltiplas Instâncias sem Sincronização é denotado por $A_i^I(R_k, d_i, I_i)$, onde:

1. $R_k \in \mathcal{P}$ é o papel responsável pela execução da atividade;
2. $d_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade;
3. I_i é uma variável aleatória discreta assumindo valores no intervalo $[1;k]$, que representa o número de instâncias a ser criado.

e corresponde a uma GSPN $A_i^I(R_k, d_i, I_i) = (P_I, T_I, \Pi_I, I_I, O_I, H_I, M_0^I, \omega_I)$, que é definida da seguinte forma:

1. $P_I = \{R_k, W_i, S_i, P_{I_i}, P_{count-i}, P_{sel-i}\}$, onde:

- R_k é um lugar correspondendo ao papel R_k ;

- W_i é um lugar chamado de Worklist place;
- S_i é um lugar chamado de Service place;
- P_{I_i} ; $P_{count-i}$; P_{sel-i} são lugares auxiliares;

2. $T_I = \{q_i, T_{ACTIVITY-i}, qu_1, \dots, qu_k, qd, qe\}$, onde:

- $q_i, qu_1, \dots, qu_k, qd, qe$ são transições imediatas;
- $T_{ACTIVITY-i}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_i .

3. I_I, O_I são tais que:

- (a) a pré-condição $\bullet q_i = \{W_i, R_k\}$ e a pós-condição $q_i \bullet = \{S_i\}$;
- (b) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-i} \bullet = \{R_k, P_{sel-i}\}$;
- (c) $P_{I_i} \bullet = \{qu_1, \dots, qu_k\}$;
- (d) $qu_j \bullet = \{W_i, P_{count-i}\}$, $j = 1, \dots, k$; tal que:
 - i. $O(qu_j, P_{count-i}) = 1$;
 - ii. $O(qu_j, W_i) = j$.
- (e) $\bullet P_{sel-i} = \{T_{ACTIVITY-i}\}$;
- (f) $\bullet qd = \{P_{sel-i}, P_{count-i}\}$;
- (g) $\bullet qe = \{P_{sel-i}\}$;
- (h) $\circ qe = \{P_{count-i}\}$.

4. a função peso ω_I é tal que:

$$(a) \omega_I(qu_j) = Pr(I = j), \quad j = 1, \dots, k;$$

Uma Atividade com Múltiplas Instâncias sem Sincronização A_i^I corresponde a um Sub-processo U tal que $Start(U) = P_{I_i}$ e $End(U) = \{qd\}$.

A taxa de chegada no *Worklist Place* da Atividade é $\lambda E(I_i)$, onde λ é a taxa de chegada em P_{I_i} . O número médio de *Cases* na Atividade é medido pela esperança da marcação do lugar $P_{count-i}$:

$$E(n_i) = E(P_{count-i}) .$$

6.3.3 Múltiplas Instâncias com Conhecimento em Tempo de Projeto

Esta Atividade corresponde ao padrão *Multiple Instance with a Priori Run-time Knowledge* (WCP13). Consiste em uma situação em que múltiplas instâncias são criadas para processar um *Case*, onde o número necessário é fixo e conhecido durante a definição do Workflow. As instâncias precisam ser sincronizadas, de maneira que o processamento do *Case* prossegue apenas quando todas são concluídas.

O modelo cria múltiplos *Work Items* para cada *Case* que chega e sincroniza-os ao final da execução da Atividade. Para isto, são utilizados arcos com pesos iguais ao número N de *Work Items*. A Fig. 6.12 apresenta este modelo.

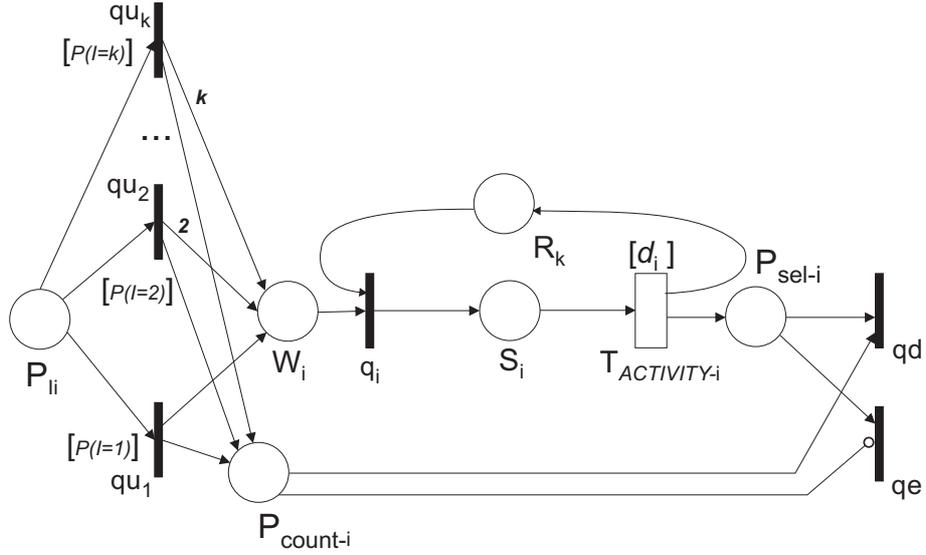


Figura 6.11: Atividade com Múltiplas Instâncias sem Sincronização

Definição 6.50 (Modelo de Atividade M. I. com C. em Tempo de Projeto)
 Este modelo é denotado por $A_i^N(R_k, d_i, N)$, onde:

1. $R_k \in \mathcal{P}$ é o papel responsável pela execução da atividade;
2. $d_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade;
3. $N \in \mathbb{N}, N > 1$ é o número inteiro de instâncias a ser criado para cada Case.

e corresponde a uma GSPN $A^N(R_k, d_i, N) = (P_N, T_N, \Pi_N, I_N, O_N, H_N, M_0^N, W_N)$, que é definida da seguinte forma:

1. $P_N = \{R_k, W_i, S_i, P_{N_i}, P_{W_i}\}$, onde:
 - R_k é um lugar correspondendo ao papel r ;
 - W_i é um lugar chamado de Worklist place;
 - S_i é um lugar chamado de Service place;
 - P_{N_i}, P_{W_i} são lugares auxiliares;
2. $T_N = \{q_i, T_{ACTIVITY-i}, qm_i, qz_i\}$, onde:
 - q_i, qm_i, qz_i são transições imediatas;
 - $T_{ACTIVITY-i}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_i .
3. I_N, O_N são tais que:
 - (a) a pré-condição $\bullet q_i = \{W_i, R_k\}$ e a pós-condição $q_i \bullet = \{S_i\}$;
 - (b) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-i} \bullet = \{R_k, P_{W_i}\}$;
 - (c) $P_{N_i} \bullet = \{qm_i\}$;

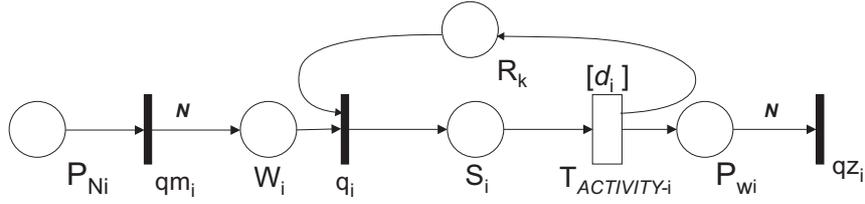


Figura 6.12: Atividade com Múltiplas Instâncias com Conhecimento em Tempo de Projeto

- (d) $\bullet P_{W_i} = \{T_{ACTIVITY-i}\}$;
- (e) $O(qm_i, W_i) = N$; (arco com peso N de qm_i a W_i);
- (f) $I(qz_i, P_{W_i}) = N$; (arco com peso N de P_{W_i} a qz_i).

Uma Atividade com Múltiplas Instâncias com Conhecimento em Tempo de Projeto A_i^N corresponde a um Sub-processo U tal que $Start(U) = P_{N_i}$ e $End(U) = \{qz_i\}$.

Uma vez que há N itens para cada *Case*, o número médio de *Cases* nesta Atividade é dado por:

$$E(n_i) = \frac{1}{N} \left[E(W_i) + E(S_i) \right].$$

6.3.4 Atividade com Recurso Especialista e Generalista

Esta situação corresponde a uma Atividade que pode ser executada por recursos de dois papéis, um deles representando um especialista e outro um generalista. Cada um deles executa a Atividade no seu próprio tempo, sendo o especialista mais eficiente que o generalista.

Este modelo oferece apoio à realização de estudos para aplicação da prática *Especialista/Generalista* [MR05], citada no Cap. 4. Esta prática visa encontrar para a melhor razão entre generalistas e especialistas que devem ser empregados no processo para obter maior desempenho, qualidade, flexibilidade e menores custos.

A estrutura consiste em uma Atividade com um único *Worklist Place*, mas que tem dois *Service Places* e duas transições temporizadas, cada uma ligada a um papel diferente. O modelo é apresentado na Fig. 6.13.

Definição 6.51 (Modelo de Atividade Especialista/Generalista) *Este modelo é denotado por $A_i^G(R_s, R_g, d_{si}, d_{gi})$, onde:*

1. $R_s \in \mathcal{P}$ é o papel especialista responsável pela execução da atividade;
2. $R_g \in \mathcal{P}$ é o papel generalista responsável pela execução da atividade;
3. $d_{si} \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade por um recurso especialista;
4. $d_{gi} \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade por um recurso generalista.

e corresponde a uma GSPN $A_i^G(R_s, R_g, d_{si}, d_{gi}) = (P_G, T_G, \Pi_G, I_G, O_G, H_G, M_0^G, W_G)$, que é definida da seguinte forma:

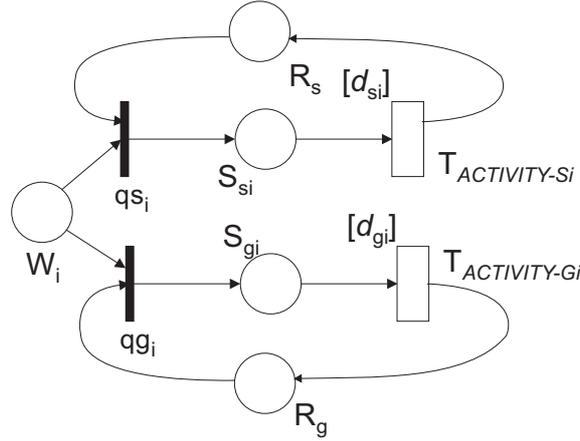


Figura 6.13: Atividade com Especialista/Generalista

1. $P_G = \{R_s, R_g, W_i, S_{si}, S_{gi}\}$, onde:

- R_s é um lugar correspondendo ao papel especialista R_s ;
- R_g é um lugar correspondendo ao papel generalista R_g ;
- W_i é um lugar chamado de Worklist place;
- S_{si} é um lugar chamado de Specialist Service place;
- S_{gi} é um lugar chamado de Generalist Service place;

2. $T_G = \{qs_i, qg_i, T_{ACTIVITY-Si}, T_{ACTIVITY-Gi}\}$, onde:

- qs_i, qg_i são transições imediatas;
- $T_{ACTIVITY-Si}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_{si} ;
- $T_{ACTIVITY-Gi}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_{gi} .

3. I_G, O_G são tais que:

- (a) a pré-condição $\bullet qs_i = \{W_i, R_s\}$ e a pós-condição $qs_i \bullet = \{S_{si}\}$;
- (b) a pré-condição $\bullet qg_i = \{W_i, R_g\}$ e a pós-condição $qg_i \bullet = \{S_{gi}\}$;
- (c) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-Si} = \{S_{si}\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-Si} \bullet = \{R_s\}$;
- (d) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-Gi} = \{S_{gi}\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-Gi} \bullet = \{R_g\}$.

Uma Atividade com Especialista/Generalista A_i^G corresponde a um Sub-processo U tal que $Start(U) = W_i$ e $End(U) = \{T_{ACTIVITY-Si}, T_{ACTIVITY-Gi}\}$.

O número médio de *Cases* é equivalente à soma do número de *tokens* nos lugares W_i, S_{si} e S_{gi} :

$$E(n_i) = E(W_i) + E(S_{si}) + E(S_{gi}) .$$

6.4 Tratamento de Exceções

Um processo bem definido prevê a ocorrência de exceções (erros ou desvios do comportamento normal), que levam à necessidade de executar um procedimento de recuperação para que o processo possa ser continuado.

Este aspecto não apenas afeta a qualidade do processo como tem impacto direto no seu desempenho. Um processo em que há freqüente ocorrência de exceções terá de executar Sub-processos de recuperação muitas vezes, consumindo recursos e aumentando o tempo médio de processamento de *Cases*.

Neste trabalho, abordaremos um tipo de exceção comum, causado quando o prazo de execução de uma Atividade é expirado, levando ao seu cancelamento e ao início de um procedimento alternativo.

6.4.1 Atividade Cancelada por Timeout Determinístico com Procedimento de Recuperação

Esta estrutura inclui uma Atividade – a qual possui um prazo para sua execução, contado a partir do momento em que um *Work Item* é criado e medido por um *clock* – e um Sub-processo de recuperação, a ser executado caso o tempo seja expirado.

O prazo para execução corresponde a um tempo determinístico. Para possibilitar a modelagem deste tempo na GSPN, utiliza-se uma técnica de aproximação bem conhecida [MR93], a qual utiliza uma distribuição Erlang de dez fases como substituta à determinística. Mecionaremos a este modelo como *transição determinística*.

Definição 6.52 (Modelo de Atividade com Timeout e Processo de Recuperação)

Um Modelo de Atividade com Timeout e Processo de Recuperação é denotado por $A_i^t(R_k, d_i, c_i, U_x, U_0)$, onde:

1. $R_k \in \mathcal{P}$ é o papel responsável pela execução da atividade;
2. $d_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo médio necessário para execução da atividade;
3. $c_i \in \mathbb{R}_+^*$ é o tempo total (determinístico) para o cancelamento de um *Work Item* caso nenhum recurso inicie sua execução;
4. U_x é o Sub-processo que deve ser executado no caso de o prazo ser expirado;
5. U_0 é o Sub-processo ao qual a execução deve voltar após a conclusão de U_x e que deve ser tal que:
 - U_0 existe em um Workflow no qual A_i^t está inserido;
 - Todo Case que sai normalmente de A_i^t deve, em algum momento, alcançar U_0 ; ou todo Case que sai de U_0 deve alcançar A_i^t com probabilidade maior do que zero;
 - Não há divisão do Case em múltiplos tokens entre U_0 e A_i^t em qualquer dos casos.

e corresponde a uma GSPN

$A_i^t(R_k, d_i, c_i, U_x, U_0) = U_x \cup (P_t, T_t, \Pi_t, I_t, O_t, H_t, M_0^t, W_t)$, que é definida da seguinte forma:

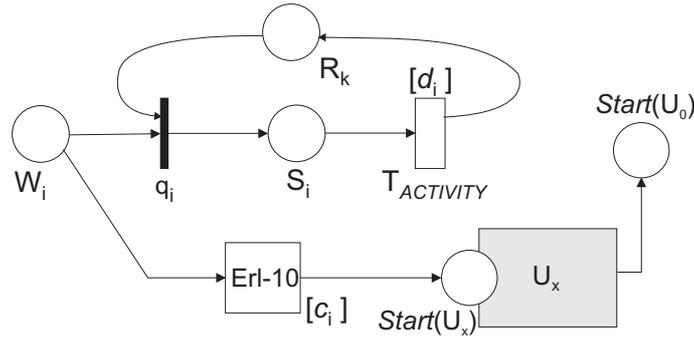


Figura 6.14: Atividade com Timeout e Processo de Recuperação

1. $P_t = \{R_k, W_i, S_i\}$, onde:

- R_k é um lugar correspondendo ao papel R_k ;
- W_i é um lugar chamado de Worklist place;
- S_i é um lugar chamado de Service place.

2. $T_t = \{q_i, T_{ACTIVITY-i}, T_{timeout-i}\}$, onde:

- q_i é uma transição imediata;
- $T_{ACTIVITY-i}$ é uma transição temporizada infinite-server com tempo médio d_i ;
- $T_{timeout-i}$ é uma transição determinística single-server com tempo igual a c_i .

3. I_t, O_t são tais que:

- (a) a pré-condição $\bullet q_t = \{W_i, R_k\}$ e a pós-condição $q_t \bullet = \{S_i\}$;
- (b) a pré-condição $\bullet T_{ACTIVITY-i} = \{S_i\}$ e a pós-condição $T_{ACTIVITY-i} \bullet = \{R_i\}$;
- (c) a pré-condição $\bullet T_{timeout-i} = \{W_i\}$ e a pós-condição $T_{timeout-i} \bullet = \{Start(U_x)\}$;
- (d) $\forall t \in End(U_x), t \bullet = \{Start(U_0)\}$.

Uma Atividade com Timeout e Processo de Recuperação A_i^t corresponde a um Sub-processo U tal que $Start(U) = W_i$ e $End(U) = \{T_{ACTIVITY-i}\}$.

6.5 Avaliando o Modelo

O modelo proposto pode ser utilizado para a realização de análise de corretude e avaliação de desempenho do Workflow.

6.5.1 Propriedade *Soundness*

Para realizar uma análise qualitativa de um Sub-processo, utiliza-se a composição definida a seguir, chamada de Modelo de Corretude do Workflow. O objetivo desta análise é verificar propriedades lógicas do Workflow. Alguns erros que podem ser encontrados por esta análise são:

- Tarefas sem condição de entrada – Não está especificada a condição necessária para a execução da tarefa;
- Tarefas sem condição de saída – Tarefas que não têm influência no processamento do *Case*;
- Tarefas mortas – O sistema nunca alcança um estado no qual a tarefa pode ser executada;
- *Deadlock* – O processamento do *Case* é bloqueado, nunca ocorrendo uma condição que permite a sua continuação;
- *Livelock* – O sistema entra em um ciclo no qual a condição de saída nunca irá ocorrer;
- Atividades ainda a serem executadas após o *Case* ter alcançado o ponto final;
- *Tokens* permanecem no sistema após a conclusão do processamento do *Case*.

Como mencionado no Cap. 5, as condições mínimas necessárias para que um Workflow esteja correto, do ponto de vista lógico, foram definidas por van der Aalst através do que ele chamou de propriedade *Soundness* [AH02].

Soundness. *Um processo é considerado logicamente correto (Sound) se ele não contém nenhuma tarefa desnecessária e se todo Case iniciado pelo processo é totalmente concluído em algum momento, não restando nenhuma referência a ele (nenhum token remanescente) no sistema.*

A propriedade *Soundness* corresponde às propriedades *liveness* e *boundedness* no Modelo de Corretude do Workflow. Caso a GSPN seja *live* e *bounded*, então o Workflow será *Sound*.

Definição 6.53 (Modelo de Corretude do Workflow) *A GSPN associada ao Modelo de Corretude de um Workflow definido pelo Sub-processo U é composta pela GSPN que modela U alterada de tal forma que:*

1. *Seja $Emp : \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{N}_+$ uma função Emprego, que atribui um número de recursos a cada papel;*
2. *$\bullet Start(U) = End(U)$;*
3. *$\forall r \in \mathcal{P}, M_0(R) = Emp(r)$, onde R é o lugar que representa o papel r ;*
4. *$M_0(Start(U)) = 1$.*

Todas as regras de composição apresentadas ao longo deste capítulo garantem que o Workflow resultante da composição será *Sound*, desde que os seus componentes também sejam *Sound*. Desta forma, qualquer modelo criado a partir dos modelos básicos e da correta aplicação das operações de composição aqui apresentados será necessariamente *Sound*.

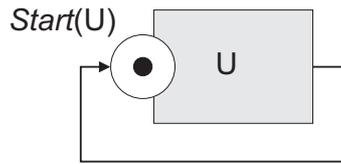


Figura 6.15: Modelo de Corretude do Workflow

6.5.2 Avaliação de Desempenho

Uma vez que a corretude do sistema seja verificada, é possível realizar a avaliação de seu desempenho.

Duas abordagens podem ser tomadas:

- **Transiente** – Avalia o comportamento do sistema durante um período de tempo a partir da saída do estado inicial;
- **Estacionária** – Avalia o comportamento do sistema no estado de equilíbrio.

Um exemplo de situação em que a avaliação transiente é mais indicada é quando deseja-se testar um processo que será posto em execução por um período determinado. Por exemplo, uma empresa pode estar estudando mudanças no processo para melhorar o atendimento durante os meses de final de ano. Um modelo é criado para avaliar o processo nas condições que ocorrem nestes meses. Uma avaliação transiente será mais precisa para medir o comportamento do sistema neste período apenas.

Na maioria dos casos, a avaliação estacionária será a de maior interesse.

Uma GSPN pode ser avaliada através de simulação ou de solução de sua cadeia de Markov. O primeiro método fornece resultados aproximados, enquanto o segundo oferece a solução exata do sistema. Apesar de a solução analítica ser a ideal, a geração da cadeia de Markov pode não ser possível quando o modelo possui um número muito grande ou infinito de estados. Nestes casos, apenas a simulação pode ser realizada.

O modelo proposto neste trabalho apresenta uma GSPN de infinitos estados, o que impossibilita a geração de sua cadeia de Markov. Portanto, resultados devem ser obtidos através de simulação. Métodos podem ser utilizados para limitar as marcações da rede, fazendo com que o número de estados seja finito e possibilitando a solução analítica. Desenvolvemos alguns métodos para conseguir tal limitação neste modelo, mas eles se mostraram aplicáveis apenas em um pequeno número de situações, de maneira que foi definido como um dos trabalhos futuros pesquisar por um método mais adequado que possibilite a solução analítica em um número maior de situações práticas.

Capítulo 7

Uma Metodologia para Melhoria de Processos

A melhoria de processos é uma tarefa, antes de tudo, científica. Trata-se da aplicação de técnicas bem definidas de forma metodológica e objetiva, em que dados são coletados e estudados empiricamente para a identificação e quantificação de características do processo.

A utilização do modelo proposto neste trabalho ocorre neste contexto. A partir de sua aplicação, é possível caracterizar quantitativamente o desempenho do processo estudado, o que permite a identificação de problemas e oportunidades de melhoria.

Este capítulo apresenta uma metodologia que pode ser utilizada para aplicação do modelo no contexto da Gestão de Processos de Negócio.

7.1 Fase 1: Definição de Metas para o Processo

A melhoria de processos é realizada com o intuito de se atingir uma meta, traçada pelo comitê de estratégia de negócios, visando melhor adaptar a empresa ao mercado e aumentar a sua vantagem competitiva. Em geral, metas globais são traçadas para a empresa e estas metas são sub-divididas em metas locais, a serem atingidas por cada um dos seus processos.

Metas estratégicas podem ser bastante gerais. Por exemplo, uma empresa pode definir como meta *criar estrutura de vendas por telefone*, o que pode vir a gerar um grande número de mudanças em seus processos e departamentos. Cabe ao comitê de arquitetura de processos definir como cada um dos processos será atingido por esta mudança. Um outro exemplo de meta poderia ser *entregar o pedido de todos os clientes em no máximo 24 horas*. Esta meta certamente será mapeada em restrições de tempo para cada um dos processos, tais como *reduzir o tempo de verificação do pagamento* ou *reduzir o tempo de busca no estoque*. Para atingir estas restrições, os processos podem ser modificados de inúmeras formas. Pode-se realizar um novo tipo de contrato com o banco para receber a notificação de pagamento em tempo hábil e pode-se adotar uma nova política de organização do estoque que ajude a encontrar produtos de forma mais rápida.

Neste trabalho, abordamos o aspecto de desempenho do processo, de forma que serão de interesse as metas relacionadas a tempo, uso de recursos e carga de trabalho. Estes fatores podem ser observados da seguinte forma:

- **Tempo** – O modelo permite estimar o tempo necessário para que uma *instância do processo* seja finalizada e permite identificar as partes do processo que mais contribuem para o aumento ou diminuição deste tempo;
- **Recursos** – O modelo permite estimar o uso de recursos e caracterizar o impacto, no que diz respeito ao desempenho, da alteração do número de recursos presentes nos papéis que participam do processo;
- **Carga de trabalho** – O modelo permite estimar o número de *instâncias do processo* em execução. Quanto maior o número de instâncias que se precisa manter no sistema, maior a carga de trabalho. Em situações em que espaço físico é necessário para manter ou transportar os produtos correspondentes a estas instâncias, esta característica será ainda mais relevante.

A definição das metas do processo corresponde à primeira fase da metodologia de melhoria. Nesta fase, é necessário que as metas sejam especificadas claramente e de forma quantitativa e que seja descrita a relação destas metas com as metas globais da empresa. Uma vez que nem sempre é possível atingir todas as metas estipuladas, é importante que sejam atribuídas também prioridades a cada uma delas. Ao final desta fase, um documento deve ser gerado contendo estas informações.

As entradas e saídas desta fase são:

- **Entradas:** Descrição das metas globais a serem atingidas e Workflow a ser melhorado;
- **Saídas:** Documento descrevendo e atribuindo prioridades às metas do processo e relacionando-as às metas globais.

7.2 Fase 2: Seleção de Métricas

A avaliação do modelo é feita direcionada às métricas que se deseja obter. A escolha de métricas corretas é essencial para o sucesso do projeto de melhoria. Este é o objetivo desta segunda fase.

A realização de medições quantitativas da execução de um processo é um dos requisitos para uma gestão de processos madura. Para tal, métricas devem estar definidas para o acompanhamento de cada processo.

Uma vez que a meta do processo tenha sido definida, é necessário selecionar uma ou mais métricas que irão caracterizar o sucesso em atingir esta meta. Caso não exista uma métrica definida para o processo que possa medir o cumprimento da meta, então novas métricas devem ser criadas com este objetivo. Estas métricas serão mantidas ao longo de toda a vida do processo, juntando-se a outras que venham a surgir no futuro.

O documento de metas criado na fase anterior deve ser utilizado para a criação de um **documento de métricas** onde são registrados:

- Metas globais e metas do processo correspondentes (fase anterior);
- Métricas que serão usadas para avaliar cada uma das metas do processo;
- Valores que cada métrica deve apresentar para atingir a meta, que chamaremos de **valor-alvo**;

- Relações entre as métricas, quando aplicável (métricas medem fatores antagonicos? uma métrica é calculada a partir de outras?);

O documento deve atribuir um nome a cada métrica e uma descrição, de forma a garantir que todos os envolvidos tenham o mesmo entendimento sobre o que está sendo medido.

As entradas e saídas desta fase são:

- **Entradas:** Documento descrevendo e atribuindo prioridades às metas do processo;
- **Saídas:** Documento de métricas do processo.

7.3 Fase 3: Modelagem e Avaliação do Workflow

Uma vez que o objetivo do projeto de melhoria tenha sido definido e quantificado na forma de métricas, pode ser iniciada a fase de modelagem e avaliação do Workflow utilizando GSPN.

Esta fase consiste em cinco etapas:

1. Análise de dados históricos;
2. Construção do modelo em GSPN;
3. Verificação de corretude;
4. Avaliação de desempenho;
5. Documentação dos resultados.

Para a construção do modelo, é necessário que se tenha em mãos dados estatísticos sobre o desempenho de cada uma das atividades que fazem parte do Workflow. Quando se está avaliando um processo já automatizado por um Sistema de Gestão de Workflow (BPMS), esta tarefa é facilitada, pois o BPMS mantém o registro de todas as instâncias executadas e, em geral, oferece as ferramentas para que um levantamento estatístico deste histórico seja realizado. Também é necessário obter a probabilidade de cada uma das decisões em pontos de divisão do fluxo do processo.

A partir deste levantamento, um **documento de dados históricos** deve ser criado onde são registrados a taxa de chegada de *Cases* do processo e o tempo médio de execução (por um recurso) de cada uma de suas atividades.

Algumas atividades do Workflow serão executadas por recursos humanos, enquanto outras são automatizadas pelo sistema. As atividades automatizadas têm um tempo de execução muito pequeno e podem ser ignoradas na construção e avaliação do modelo. Quando se julga que o tempo de uma atividade automatizada é relevante para a avaliação, ela pode ser modelada conforme o Modelo de Atividade Automatizada já apresentado ou simplesmente seu tempo pode ser adicionado durante o cálculo dos resultados, conforme seja conveniente.

De posse dos dados necessários, o modelo em GSPN para o Workflow pode ser criado. Este modelo corresponde à versão *ESTÁ (AS IS)* do Workflow.

Deve-se criar o modelo da seguinte forma:

1. *Nomenclatura* – Cria-se uma nomenclatura para referenciar cada Atividade e participante na rede e registra-se em um documento de nomenclaturas;
2. *Composição* – Cria-se um diagrama simplificado do Workflow, em que Atividades são representadas apenas por retângulos ou círculos, identifica-se Sub-processos elementares e as regras de composição que serão aplicadas para compor estes Sub-processos (a identificação dos Sub-processs deve também ser adicionada ao documento de nomenclaturas);
3. *Fluxo* – Calcula-se a taxa de chegada em cada um dos Sub-processos de acordo com as expressões fornecidas no Cap. 6;
4. *Número mínimo de recursos* – Verifica-se se o número mínimo de recursos em cada papel está sendo fornecido. Caso contrário, pode ter havido algum engano nos tempos levantados ou nas taxas de chegada obtidas;
5. *Papéis* – Criam-se os lugares para cada um dos papéis participantes do Workflow e atribui-se a marcação inicial conforme o número de recursos disponíveis na empresa;
6. *Atividades* – Criam-se os modelos de cada Atividade, atribuindo-se os respectivos tempos de execução e ligando-as aos participantes correspondentes;
7. *Operadores* – Criam-se os modelos dos operadores aplicados em cada composição de Atividades;
8. *Sistema* – Criam-se os elementos complementares, conforme o Modelo de Sistema de Workflow.

A Tabela 7.1 apresenta um formato que pode ser utilizado para o documento de nomenclatura.

Tabela 7.1: Modelo de documento de nomeclatura

Empresa X					
Processo: Nome do processo					
Sub-processo	Operador	Atividade	Nome	Papel	Nome
S_1	SEQ	A_1	<i>Fazer Atividade1</i>	R_1	<i>Papel1</i>
		A_2	<i>Fazer Atividade2</i>	R_2	<i>Papel2</i>
S_2	LOOP	A_3	<i>Fazer Atividade2</i>	R_3	<i>Papel1</i>
		A_4	<i>Fazer Atividade3</i>		
		A_5	<i>Fazer Atividade4</i>		

O próximo passo corresponde à análise do modelo. Primeiro, deve-se verificar a corretude do Workflow. Deve-se observar que, caso haja um problema, este pode ser devido a uma modelagem incorreta ou porque alguma parte do processo não está sendo executada como descrito na sua documentação. Um processo já em prática tem poucas chances de apresentar erros de corretude.

A avaliação do desempenho é realizada em seguida. As métricas a serem avaliadas são inseridas na ferramenta de avaliação, escolhe-se o tipo de análise (transiente ou estacionária) e os parâmetros para a simulação.

Concluída a avaliação do modelo, os resultados devem ser registrados em uma **planilha de resultados**. Devem ser apresentados os parâmetros utilizados na simulação e o resultado de cada métrica, com seus respectivos intervalos de confiança.

As entradas e saídas desta fase são:

- **Entradas:** Workflow, dados históricos de execução, documento de métricas do processo;
- **Saídas:** Documento de dados históricos, documento de nomenclatura, modelo GSPN da versão *ESTÁ*, planilha de resultados.

7.4 Fase 4: Analisando os Resultados

Esta fase consiste na execução dos seguintes passos:

1. Cálculo de métricas derivadas;
2. Comparação dos resultados obtidos com os valores-alvo de cada métrica;
3. Identificação de pontos críticos.

Algumas métricas não são obtidas diretamente na simulação, mas são calculadas a partir das métricas fornecidas pela simulação, como é o caso do tempo de resposta do sistema ($E(\tau)$). O primeiro passo desta fase é o cálculo destas métricas. Provavelmente, a melhor opção é inserir os dados de simulação em uma planilha eletrônica que realize estes cálculos automaticamente.

Tendo em mãos todas as medidas necessárias, realiza-se a comparação dos resultados com os valores-alvo de cada métrica, para que se obtenha um valor numérico para o desvio do valor obtido para o valor-alvo. Pode-se optar por apresentar este desvio em valores absolutos ou em porcentagem. Esta informação é acrescentada à planilha de resultados.

A Tabela 7.2 mostra um modelo de planilha de resultados contendo estas informações.

Por fim, identifica-se os pontos críticos do sistema, que são as Atividades ou Sub-processos que têm maior influência nos desvios encontrados. Para realizar esta identificação, cria-se uma **matriz de influência** em que são relacionadas métricas e Atividades ou Sub-processos. A construção desta matriz é feita da seguinte forma:

1. Cada linha corresponde a um Sub-processo (ou Atividade);
2. Cada coluna corresponde a uma métrica;
3. O valor de cada elemento Sub-processo \times Métrica é calculado com base nas regras de composição aplicadas, que indicam a contribuição do valor da métrica do Sub-processo para o valor total.

Um exemplo desta matriz pode ser visto no estudo de caso, apresentado no Cap. 8.

As entradas e saídas desta fase são:

- **Entradas:** Documento de métricas, planilha de resultados, modelo do Workflow;
- **Saídas:** Planilha de resultados atualizada, matriz de influência.

Tabela 7.2: Modelo de planilha de resultados

Empresa X						
Processo: Nome do processo						
Meta Global	Meta Local	Métrica	Alvo	Média	Int. de conf.	Desvio (%)
Meta 1	Meta 1.1	Métrica a	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica b	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica c	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
	Meta 1.2	Métrica c	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica d	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
Meta 2	Meta 2.1	Métrica x	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica y	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica z	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
	Meta 2.2	Métrica k	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
		Métrica w	n	m	[m1; m2]	$(n-m)/n\%$
Parâmetros da simulação:						
Confiabilidade: XX%						
Erro: YY%						
Outros dados						

7.5 Fase 5: Realizando Mudanças

A fase de mudanças é a mais importante na realização do projeto de melhoria. Neste momento o analista deverá utilizar todas as informações coletadas para definir melhorias para o processo. O modelo em GSPN irá auxiliá-lo nesta tarefa, fornecendo uma estimativa para o comportamento futuro do processo, após a implantação das modificações.

A abordagem que será realizada pelo analista para melhorar o processo irá depender do problema sendo abordado, das políticas da empresa e da sua experiência em outros projetos. Algumas características mais evidentes que deve-se tentar alterar em um processo e que têm impacto direto em seu desempenho, são:

- Eliminar Atividades que não adicionam valor;
- Aproveitar oportunidades de paralelismo;
- Diminuir o número de iterações ou a quantidade de Atividades em um ciclo iterativo;
- Mover recursos ociosos para papéis com maior carga de trabalho;
- Adicionar mais recursos;
- Delegar poderes aos funcionários, diminuindo a atuação de supervisores ou gerentes em partes do processo.

Como regra geral, deve-se evitar ao máximo que uma Atividade muito dispendiosa seja executada sem necessidade e diminuir o uso de recursos que são escassos. Quando isso não for possível, deve-se tentar tirar proveito de paralelismo e de recursos ociosos.

A metodologia proposta neste trabalho está preocupada com a interação entre Atividades e entre Atividades e recursos, mas não com estes elementos de forma singular. Metodologias complementares podem ser aplicadas para aumentar a produtividade de funcionários, automatizar ou otimizar a execução de Atividades entre outras inúmeras opções.

As mudanças idealizadas são utilizadas para a definição de uma nova versão do Workflow, correspondente à versão *PODERIA (COULD BE)*. Este Workflow poderá trazer, além de mudanças estruturais e mudanças no número de recursos, mudanças também nas probabilidades de divisão de fluxo ou nas estimativas de tempo para as Atividades. Por exemplo, se uma técnica que será aplicada afirma que o tempo de busca no estoque será reduzido em 20%, então no modelo *PODERIA* esta Atividade será 20% mais rápida que no modelo original.

O novo Workflow deve ser modelado e as novas informações sobre probabilidades e tempos devem ser registradas em um **documento de estimativa de mudança**.

Feito isto, o modelo em GSPN do novo Workflow deve ser criado e avaliado, seguindo-se os mesmos passos já realizados nas fases 3 e 4. Caso a avaliação do modelo demonstre que o seu comportamento irá atingir as metas desejadas, então o objetivo foi atingido. Caso contrário, novas modificações devem ser feitas, até que o resultado seja aceitável.

Uma vez que a versão final do Workflow (*DEVERIA/SHOULD BE*) tenha sido encontrada, deve ser criado um documento que registre todas as mudanças que devem ser feitas no processo original para que as metas sejam atingidas e também qual o desempenho estimado para o processo após as mudanças. Este será o **plano de mudança** do processo.

Esta fase conclui a metodologia para melhoria proposta neste trabalho. Após isso, ainda é necessário a execução de uma fase de implantação, na qual o processo real é atualizado para a nova versão e seu início é acompanhado. Este tipo de atividade corresponde a uma área da administração chamada *Gestão de Mudança* e é essencial para o sucesso de um grande projeto.

As entradas e saídas desta fase são:

- **Entradas:** Documento de métricas, planilha de resultados atualizada, modelo do Workflow, modelo GSPN *AS IS*, matriz de influência;
- **Saídas:** Plano de mudança.

Capítulo 8

Estudos de Caso

Este capítulo ilustra a aplicação da metodologia proposta neste trabalho na avaliação e melhoria de dois processos.

O primeiro processo avaliado foi obtido de uma indústria de coberturas metálicas. É apresentada a execução de todas as fases da metodologia e os artefatos produzidos, de forma que se possa ter uma amostra da utilização completa da metodologia.

O segundo processo é proveniente de uma empresa de desenvolvimento de software. É apresentada uma situação hipotética para ilustrar a utilização do modelo em GSPN para solucionar um problema de alocação de recursos humanos na empresa.

As análises foram feitas utilizando a ferramenta TimeNet 3.0 [GKZH95], que é uma conhecida ferramenta destinada a análise e simulação de GSPN (e algumas de suas extensões).

8.1 Estudo de Caso 1: Indústria de Coberturas Metálicas

Utilizamos neste estudo de caso o processo chamado *Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias*, de uma indústria de coberturas metálicas sediada em Pernambuco. Esta indústria aplica um método próprio para fabricação de coberturas sob demanda, de acordo com as necessidades do empreendimento de cada cliente. Para cada novo projeto atendido, uma solução única é projetada, fabricada e montada.

O processo em questão é executado na fase inicial, após o contato com o cliente, e consiste na análise do cenário, criação do pré-projeto de solução e orçamento do preço final do contrato. Três participantes atuam no processo: o Departamento Comercial, que é responsável pela negociação com o cliente; o Arquiteto, que é responsável pela análise do cenário e criação do pré-projeto; e o Engenheiro de Orçamento, responsável por calcular os custos do projeto. Uma vez definido o custo, o processo pode passar diversas vezes pela análise do cliente, por intermédio do Departamento Comercial, até que se encontre um preço favorável a ambos.

O Workflow deste processo é apresentado na Fig. 8.1. O processo, em sua maior parte, não é automatizado. Devido a isto, dados históricos precisos não estão disponíveis. Os tempos médios de cada Atividade foram estimados pelos participantes, assim como as probabilidades de cada decisão ao longo do fluxo. A taxa de chegada foi calculada a partir de dados históricos existentes.

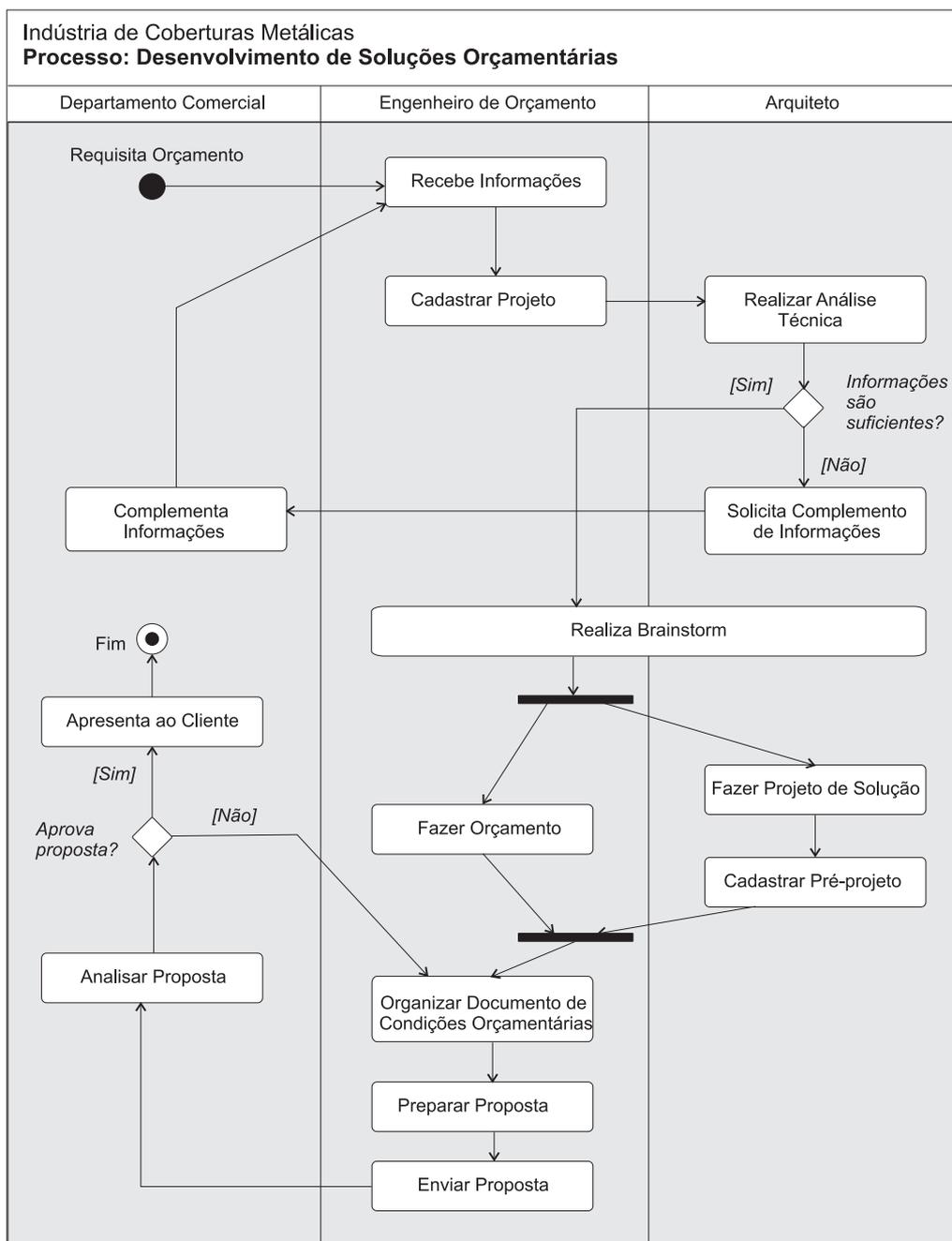


Figura 8.1: Workflow abordado no estudo de caso

8.2 Aplicação da Metodologia

8.2.1 Fase 1: Definição de Metas para o Processo

Assumiremos que o objetivo da empresa é reduzir o tempo entre o contato com o cliente e o fechamento do contrato, o que é principalmente definido pelo tempo de execução do processo em questão. Esta não é uma carência real da empresa no momento, mas é uma melhoria que adiciona valor ao serviço e será utilizada para melhor ilustração da metodologia.

Para especificar a meta do processo, definiremos que o gerente deseja que o tempo médio seja reduzido em 20%. Desta forma, teremos um parâmetro quantitativo para definir a melhoria a ser realizada.

8.2.2 Fase 2: Seleção de Métricas

A empresa não possui uma metodologia de controle deste processo baseada em métricas. Neste projeto, a métrica que nos dará a informação de que precisamos é o tempo de resposta do sistema.

Tabela 8.1: Métricas do estudo de caso

Indústria de Coberturas Metálicas	
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias	
Meta Global	Agilizar início dos projetos
Meta Local	Reduzir 20% do tempo do orçamento
Métrica	Tempo de resposta
Código	M-1
Descrição	Tempo médio que se passa entre o momento do pedido de orçamento até a entrega final ao cliente.
Valor-alvo	Atual menos 20%

O documento de métricas elaborado nesta fase contém os dados conforme a Tabela 8.1. Observe que, devido a sua simplicidade, este não precisa ser um documento separado, mas parte ou seção de um documento maior do projeto. O mesmo vale para qualquer dos outros documentos.

8.2.3 Fase 3: Modelagem e Avaliação do Workflow

Como já mencionado, dados históricos precisos das execuções do processo não estão disponíveis. Os tempos médios de cada Atividade e probabilidades de caminhos alternativos foram estimados por participantes do processo e são apresentados na Tabela 8.2. O valor da taxa de chegada foi calculado a partir de registros disponíveis sobre a entrada de pedidos.

A primeira e última atividades do Workflow (ver Fig. 8.1) foram consideradas irrelevantes para esta análise.

O diagrama de composição para identificação de Sub-processos é apresentado na Fig. 8.2.

Tabela 8.2: Histórico do estudo de caso (estimado)

Taxa de chegada	0,0875 <i>Cases</i> /hora
Cadastrar Projeto	10 min.
Realizar Análise Técnica	2 horas
Solicitar Complemento de Informações	10 min.
Complementar Informações	12 horas
Realizar <i>Brainstorm</i>	1 hora
Fazer Orçamento	4 horas
Projetar Solução	4 horas
Cadastrar Pré-projeto	10 min.
Organizar Documentos ECO	30 min.
Preparar Proposta	30 min.
Enviar Proposta	5 min.
Analisar Proposta	4 horas
Informações suficientes?	40% Não
Proposta aprovada?	80% Não

As Tabelas 8.3, 8.4 e 8.5 apresentam, respectivamente, a nomenclatura utilizada no modelo, as taxas de chegada em cada Sub-processo e o número mínimo de recursos em cada papel.

Tabela 8.3: Nomenclatura usada no estudo de caso

Indústria de Coberturas Metálicas					
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias					
Sub-pr.	Operador	Ativid.	Nome	Papel	Nome
S_1	SEQ	A_2	<i>Cadastrar Projetos</i>	<i>DC</i>	<i>Dept. Comercial</i>
		A_3	<i>Análise Técnica</i>	<i>ENG</i>	<i>Eng. Orçamento</i>
S_2	SEQ	A_4	<i>Solicitar Complemento</i>	<i>AQ</i>	<i>Arquiteto</i>
		A_5	<i>Compl. Informações</i>		
S_3	AND	A_6	<i>Brainstorm</i>		
		A_7	<i>Brainstorm</i>		
S_4	G-LOOP	S_1, S_2			
		S_3			
		A_8	<i>Fazer Orçamento</i>		
S_5	SEQ	A_9	<i>Criar Solução</i>		
		A_{10}	<i>Cadastrar Pré-projeto</i>		
S_6	AND	A_8, S_5			
		A_{11}	<i>Organizar Documentos</i>		
S_7	LOOP	A_{12}	<i>Preparar Proposta</i>		
		A_{13}	<i>Enviar Proposta</i>		
		A_{14}	<i>Analisar Proposta</i>		
S_8	SEQ	A_{11}, S_7			

O modelo do Sistema de Workflow em GSPN é apresentado na Fig. 8.3. O Modelo de Corretude correspondente é *live* e *bounded*, demonstrando que o processo é *Sound*. Foi realizada uma simulação do estado estacionário com 99% de confiança e tolerância a erro de 10%.

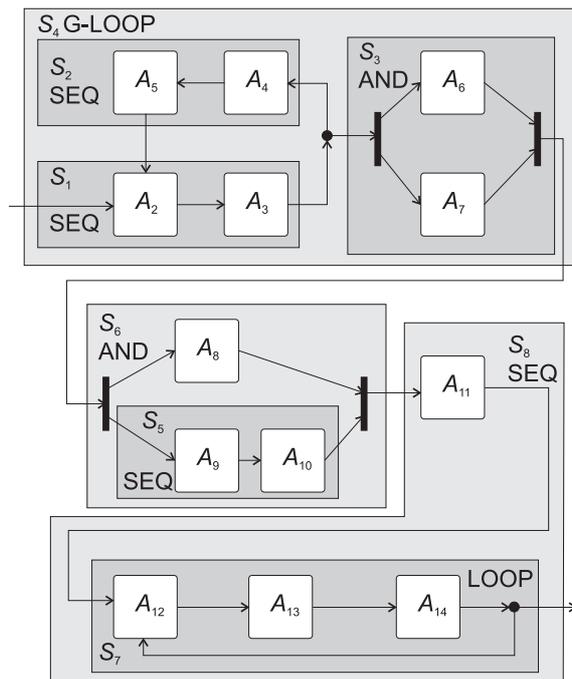


Figura 8.2: Diagrama de composição do estudo de caso

Tabela 8.4: Taxas de chegada internas em cada Sub-processo

Indústria de Coberturas Metálicas			
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias			
Sub-processo	Taxa	Sub-processo	Taxa
S_1	0,1458	S_5	0,0875
S_2	0,058	S_6	0,0875
S_3	0,0875	S_7	0,1093
A_8	0,0875	A_{11}	0,0875

Tabela 8.5: Cálculo do número mínimo de recursos em cada papel

Indústria de Coberturas Metálicas					
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias					
Recurso	Valor	Recurso	Valor	Recurso	Valor
DC	$K > 1, 1332$	ENG	$K > 0, 5693$	AQ	$K > 0, 7534$

8.2.4 Fase 4: Analisando os Resultados

O valor do tempo de resposta é obtido a partir do número de *Cases* no sistema, aplicando-se a Lei de Little (tempo médio = número de clientes/taxa de chegada) [BGdMT98]. Realizamos a simulação para obter o número médio de *Cases* em cada Atividade e combinamos estes valores de acordo com a regra de composição de cada Sub-processo, levando ao total de 10,7 *Cases* em média no sistema. A partir deste valor, encontramos o tempo de resposta de 122 horas (equivalente a cerca de 15 dias úteis numa jornada de 8 horas). O resultado é apresentado na Tabela 8.6. Os funcionários da empresa consideram estes valores razoáveis em comparação ao que ocorre na realidade.

Calculamos então a Matriz de Influência, a partir dos resultados de cada Ativi-

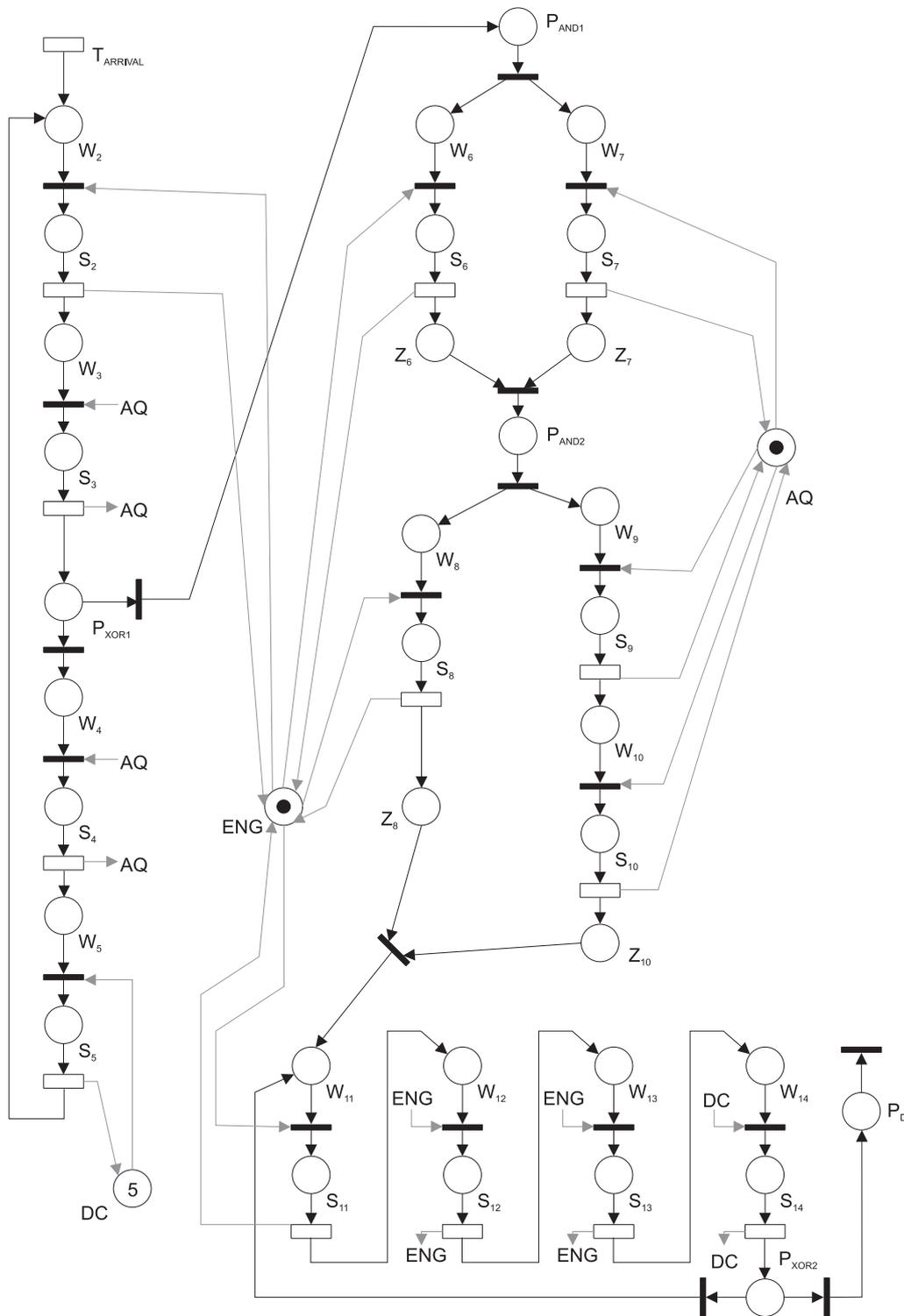


Figura 8.3: Modelo em GSPN do estudo de caso

Tabela 8.6: Resultados da avaliação

Indústria de Coberturas Metálicas	
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias	
Meta Global	Agilizar início dos projetos
Meta Local	Reduzir 20% do tempo do orçamento
Métrica	Tempo de resposta
Média	121,98 horas
Alvo	97,58 horas
Desvio (%)	20%
Parâmetros da simulação:	
Confiabilidade: 99%	
Erro: 10%	
Ferramenta: TimeNet 3.0	

dade. A Tabela 8.7 apresenta os elementos da matriz. Uma vez que há uma única métrica a ser melhorada, a matriz terá uma única coluna. O cálculo do valor de influência da Atividade A_i é a relação entre o tempo de permanência do *Case* na Atividade (contabilizando o tempo total quando há diversas iterações) dividido pelo tempo de resposta total do sistema, $\lambda E(n_i)/E(\tau)$. Os tempos de espera por sincronização, não estando associados a uma Atividade em particular, são apresentados separadamente.

Tabela 8.7: Matriz de influência

Atividade	Influência	Atividade	Influência
A_2	5,91%	A_9	3,41%
A_3	14,47%	A_{10}	1,59%
A_4	2,30%	Sincr. A_8, A_{10}	3,75%
A_5	6,47%	A_{11}	3,37%
A_6	1,59%	A_{12}	19,57%
A_7	2,26%	A_{13}	9,38%
Sincr. A_6, A_7	2,20%	A_{14}	21,02%
A_8	2,71%		

Através da Matriz de Influência, podemos observar claramente quais são as Atividades que mais contribuem para o tempo de execução do *Case*. Observa-se que as Atividades A_3 (Análise Técnica), A_{12} (Preparar Proposta) e A_{14} (Analisar Proposta) são as mais críticas neste processo.

8.2.5 Fase 5: Realizando Mudanças

Pode-se identificar, através da Matriz de Influência, os pontos críticos do sistema, cujo melhoramento irá trazer maiores benefícios. Para as Atividades identificadas, temos as seguintes opções iniciais para melhoria:

- Reduzir o seu tempo de execução;
- Reduzir o número de vezes que é executada;

- Aumentar o número de recursos ou mover recursos ociosos para este papel.

Observa-se que as Atividades A_{12} e A_{14} se encontram na mesma estrutura iterativa e que, além disso, esta é a estrutura com menor probabilidade de saída, o que causa este grande impacto observado no desempenho do processo. Devido a isto, uma importante melhoria seria tentar reduzir o número de vezes em que esta iteração é executada.

Tabela 8.8: Resultados da avaliação da versão *PODERIA*

Indústria de Coberturas Metálicas	
Processo: Desenvolvimento de Soluções Orçamentárias (<i>COULD BE</i>)	
Meta Global	Agilizar início dos projetos
Meta Local	Reduzir 20% do tempo do orçamento
Métrica	Tempo de resposta
Média	99,56 horas
Alvo	97,58 horas
Desvio (%)	2%
Parâmetros da simulação:	
Confiabilidade: 99%	
Erro: 10%	
Ferramenta: TimeNet 3.0	

O que faz um *Case* retornar à execução deste Sub-processo é a não aprovação, por parte do Departamento Comercial (cliente), da proposta de orçamento entregue. Isto porque, muitas vezes, cortes de custos precisam ser feitos para que o valor caia até aquele que seja aceito pelo cliente.

Uma forma de reduzir esta taxa de desaprovação da proposta pode ser a elaboração de versões alternativas da proposta, com outras opções de custo, que podem ser utilizadas pelo Departamento Comercial para encontrar um acordo com o cliente de forma mais ágil. Por exemplo, diversas marcas de material podem ser fornecidas, em ordem decrescente de preço, em que são mantidos os requisitos mínimos de segurança e qualidade exigidos. O Departamento Comercial poderia, então, realizar o acordo com o cliente com maior independência, equilibrando preços e margem de lucro da empresa e reduzindo a necessidade de intervenção do Engenheiro de Orçamento.

Esta mudança aumentaria o tempo de execução da Atividade *Preparar Proposta*, devido à necessidade de criar uma proposta mais elaborada. Também seria aumentado o tempo de execução da Atividade de *Avaliar a Proposta* por parte do Departamento Comercial, pois este terá um número ainda maior de informações para avaliar e um tempo maior para acordo com o cliente. Em contrapartida, a probabilidade de saída do ciclo iterativo seria fortemente aumentada. Apenas em casos em que o Departamento Comercial não encontra uma configuração ideal com os dados de orçamento que possui é que seria necessário uma nova elaboração de proposta pelo Engenheiro de Orçamento.

Na versão atual, a cada 5 propostas que chegam ao Departamento Comercial apenas uma é aceita. Para estimar qual será esta proporção após a modificação, podemos avaliar no histórico do processo quais foram as causas das reprovações ocorridas. Para cada uma delas, verifica-se se ela ocorreria ou não caso a nova política

estivesse implantada. Contabiliza-se então apenas as reprovações que ocorreriam mesmo com a nova política e pode-se, então, encontrar uma nova proporção para a sua ocorrência. Uma vez que não foi possível fazer um levantamento com este nível de detalhe, pedimos ao Engenheiro de Orçamento da empresa para realizar esta estimativa com base em sua experiência. A probabilidade de rejeição estimada foi de 20%.

Os tempos de execução das tarefas após estas mudanças foram estimados em 4 horas para a preparação da proposta (oito vezes maior) e 12 horas para a avaliação da proposta (três vezes maior). Um aumento considerável devido à necessidade de maior esforço por parte de ambos os participantes.

Desta forma, chegamos a uma versão *PODERIA* do Workflow. Nenhuma modificação em sua estrutura foi realizada, mas a definição de duas Atividades foi alterada, satisfazendo os novos requisitos propostos.

A GSPN desta versão foi modelada e avaliada, e o resultado obtido para o tempo de resposta, apresentado na Tabela 8.8, foi de 99,6 horas, um resultado extremamente próximo ao objetivo e que aceitaremos como suficiente para a conclusão do projeto de melhoria. Esta versão do Workflow passa então a ser a versão *DEVERIA*, em que se estima obter um desempenho 18,4% melhor que o processo atual, que aceitamos como suficientemente próximo da meta (pequenas melhorias em outras Atividades poderiam ser realizadas para se alcançar o valor ideal, mas não consideraremos isto neste estudo de caso).

O **plano de mudança** a ser apresentado como resultado deste projeto aconselha como melhoria para este processo **modificar a definição das Atividades Preparar Proposta e Avaliar Proposta, de maneira que:**

- *O Engenheiro de Orçamento irá fornecer na proposta diversas opções de materiais e fornecedores que poderão ser utilizados no projeto e os custos de cada um deles;*
- *O Departamento Comercial irá utilizar estes dados da proposta para discutir com o cliente a solução que lhe é mais satisfatória, mantendo a margem de lucro desejada pela empresa. A proposta voltará ao Engenheiro de Orçamento apenas quando uma solução não for encontrada pelo Departamento Comercial.*

Isto irá diminuir o número de iterações necessárias até que um contrato seja firmado, aumentando o desempenho do processo em 18,4%.

8.3 Estudo de Caso 2: Especialistas e Generalistas

Realizamos um segundo estudo de caso para ilustrar a aplicação do modelo em problemas de alocação de recursos. Para tanto, partimos de um processo real fornecido por uma empresa de Desenvolvimento de Software. O Workflow corresponde a um processo de implementação de mudança de requisitos.

O problema abordado envolve a decisão pela especialização ou não das Atividades executadas pelos recursos.

Assumimos uma situação hipotética para esta empresa que consiste no seguinte:

1. a empresa possui 5 desenvolvedores que são responsáveis por todo tipo de implementação;

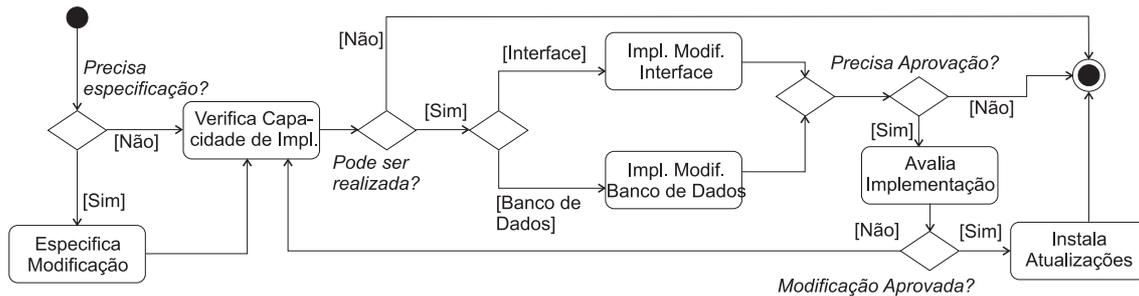


Figura 8.4: Workflow da empresa de software

Tabela 8.9: Participantes de cada Atividade

Atividade	Papel
Especifica Modificação	Stakeholder
Verifica Capacidade de Implementar	Analista
Implementa Modificação de Interface	Desenvolvedor de Interface
Implementa Modificação de Banco de Dados	Desenvolvedor de BD
Avalia Implementação	Stakeholder
Instala Atualizações	Qualquer desenvolvedor

- os requisitos se dividem em dois tipos de modificação: implementação de interface e implementação de banco de dados;
- a empresa deseja fornecer treinamento e especializar alguns funcionários em cada uma das duas tarefas, criando três cargos diferentes de desenvolvimento: desenvolvedor de interface, desenvolvedor de banco de dados e desenvolvedor geral;
- os salários dos desenvolvedores especialistas é maior que o do generalista.

A questão enfrentada pelo gerente desta empresa é definir quantos desenvolvedores devem ser treinados para desenvolvimento de interface e quantos para banco de dados.

O processo é apresentado na Fig. 8.4. As Atividades automatizadas já foram removidas neste diagrama. Os participantes de cada Atividade estão descritos na Tabela 8.9.

Para simplificar, não iremos dividir este exemplo em fases.

Para realizar uma análise incluindo custos, atribuímos os seguintes salários hipotéticos para cada desenvolvedor: \$15/hora para o Desenvolvedor de Interface, \$20/hora para o Desenvolvedor de Banco de Dados e \$10/hora para o Desenvolvedor Geral.

A GSPN correspondente a este processo é apresentada na Fig. 8.5. Os tempos atribuídos a cada Atividade são apresentados na Tabela 8.10 e as probabilidades de cada caminho são fornecidas na Tabela 8.11.

O modelo foi simulado com 99% de confiança e tolerância a erro de 10%, na ferramenta TimeNet. Os tamanhos de fila, número de *Cases* em serviço em cada Atividade foram somados e o tempo médio de resposta do sistema foi calculado. Estes resultados são apresentados na Tabela 8.12. Nós fizemos isto para um conjunto de sete diferentes configurações de especialistas e generalistas. A Fig. 8.6 mostra um

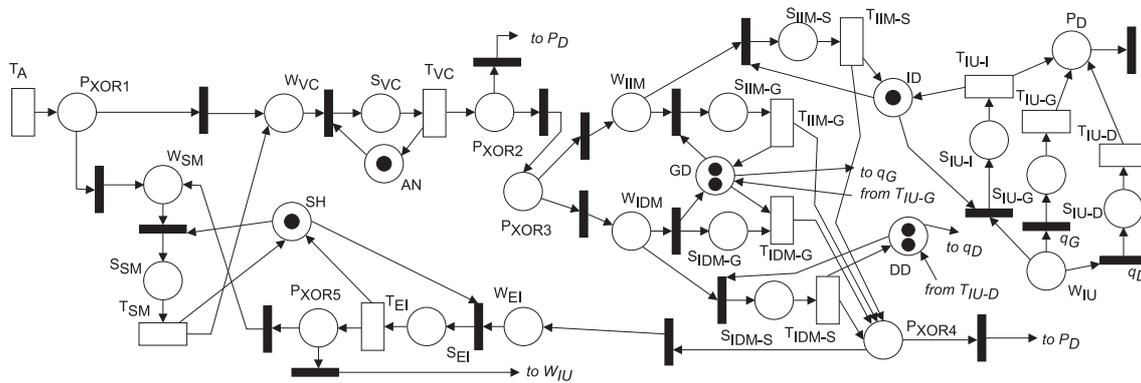


Figura 8.5: Modelo GSPN do segundo estudo de caso

Tabela 8.10: Transições e delays de cada Atividade

Empresa de Desenvolvimento de Software		
Processo: Modificação de Requisito		
Atividade	Transição	Delay (horas)
Transição de Chegada	T_A	15
Especifica Modificação	T_{SM}	6
Verifica Capacidade de Implementar	T_{VCI}	4
Modificação de Interface (espec.)	T_{IIM-S}	40
Modificação de Interface (gen.)	T_{IIM-G}	60
Modificação de Banco de Dados (espec.)	T_{IDM-S}	35
Modificação de Banco de Dados (gen.)	T_{IDM-G}	55
Avalia Implementação	T_{EI}	2
Instala Atualizações	$T_{IU-I}, T_{IU-D}, T_{IU-G}$	4

Tabela 8.11: Probabilidades nas estruturas alternativas

Decisão	Resposta Sim
Precisa Especificação?	20%
Pode Ser Realizada?	85%
Requisito de Interface?	60%
Necessita Aprovação?	80%
Modificação Aprovada?	70%

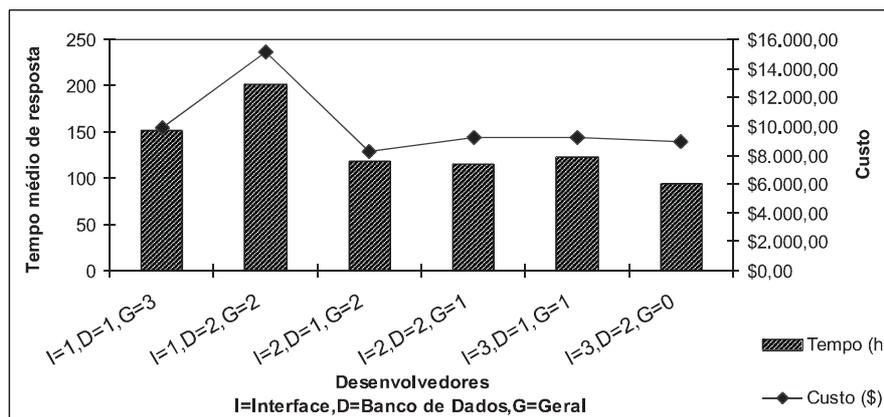


Figura 8.6: Tempos de execução e custos

Tabela 8.12: Resultados obtidos nas várias configurações

Empresa de Desenvolvimento de Software				
Processo: Modificação de Requisito				
Configuração	$\sum E(W_i)$	$\sum E(S_i)$	$E(\tau)$	Custo
1 ID; 1 DB; 3 GD	5,1333	4,9935	152 h	\$ 9.873
1 ID; 2 DB; 2 GD	8,7330	4,6979	201 h	\$ 15.109
2 ID; 1 DB; 2 GD	3,1927	4,6401	117 h	\$ 8.224
2 ID; 2 DB; 1 GD	3,2912	4,3825	115 h	\$ 9.208
3 ID; 1 DB; 1 GD	3,7908	4,3962	123 h	\$ 9.210
3 ID; 2 DB; 0 GD	2,2571	4,0305	94 h	\$ 8.959
0 ID; 0 DB; 5 GD	90,6836	5,7871	1447 h	\$ 72.353
Parâmetros da simulação:				
Confiabilidade: 99%				
Erro: 10%				
Ferramenta: TimeNet 3.0				

gráfico em que os tempos de resposta de cada configuração e os custos associados são comparados entre si. A configuração que apresentou pior resultados não está presente neste gráfico.

O custo por requisito modificado é calculado pela equação: $E(\tau) \times \sum C_i$, onde C_i é o custo por hora de cada desenvolvedor i , e $E(\tau)$ é o tempo médio necessário para a realização da modificação.

Os resultados mostram que a melhor configuração entre as experimentadas é a que apresenta 3 Desenvolvedores de Interface, 2 Desenvolvedores de Banco de Dados e nenhum Desenvolvedor Geral. Esta configuração apresenta um tempo de resposta em torno de 94 horas (12 dias) para cada modificação a um custo de \$ 8959,98 dólares. Entretanto, sob a perspectiva do custo, a configuração mais econômica foi aquela com 2 Desenvolvedores de Interface, 1 Desenvolvedor de Banco de Dados, e 2 Desenvolvedores Gerais. Esta configuração apresentou um tempo de resposta de 117 horas, ou 15 dias, a um custo de \$ 8224,59 dólares por cada modificação.

O pior resultado foi apresentado pela configuração em que apenas desenvolvedores gerais são utilizados, que seria aquela utilizada atualmente pela empresa.

Nesta situação, o tempo médio foi de 1447 horas, a um custo de \$ 72353,11 dólares por modificação.

8.4 Conclusões

O primeiro estudo de caso abordou um processo real e aplicou a metodologia apresentada neste trabalho com vistas a promover melhorias nesse processo. O estudo foi realizado em indústria de coberturas metálicas com sede em Pernambuco.

A aplicação da metodologia se mostrou efetiva em proporcionar um caminho através do qual uma meta de melhoria pode ser atingida. Partiu-se de uma meta global da empresa, que foi redefinida para o processo como uma meta local, tendo como métrica o tempo de resposta. A versão *ESTÁ* do processo foi avaliada e foram encontrados os pontos críticos no seu desempenho. Percebeu-se que o grande número de iterações era o maior problema no processo e conceberam-se mudanças que poderiam reduzir este fator.

Uma versão *PODERIA* do processo foi criada e avaliada. Os resultados demonstraram que a mudança proposta traria uma melhoria significativa no desempenho do processo, alcançando um valor próximo à meta, que foi considerado satisfatório para este estudo de caso.

Observou-se que a participação de funcionários da empresa no projeto de melhoria é importante, pois é preciso unir as informações quantitativas obtidas pelo modelo com o conhecimento e experiência dos funcionários para se encontrar as causas dos problemas e possíveis soluções. A metodologia oferece o apoio científico para guiar este processo.

O segundo estudo de caso tomou por base um processo de uma empresa de desenvolvimento de software e avaliou uma situação hipotética em que um problema de alocação de recursos humanos é abordado. O modelo de Atividade Especialista/Generalista foi utilizado. O objetivo foi encontrar um *tradeoff* entre custo e tempo de execução. Este problema corresponde à prática *Especialista/Generalista* mencionada no Cap. 4, que está entre as boas práticas para melhoria de processos. Os resultados demonstraram que os modelos oferecem uma base para estimar o comportamento do sistema e encontrar soluções que não são triviais.

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

O final do século XX foi testemunha de admiráveis avanços que se estenderam por diversos aspectos do cotidiano moderno. Sem dúvida, um dos maiores avanços tecnológicos que se experimentou neste período foi o surgimento e popularização da Internet. Esta mudança foi um novo *Big Bang* cultural e econômico, tal qual o foi a Revolução Industrial no século XIX. E assim como ocorreu na Revolução Industrial, a Internet mudou drasticamente a forma como as indústrias e empresas em geral funcionam.

A Gestão de Processos de Negócio surgiu neste contexto, encarando um cenário de rápidas e constantes mudanças, comunicação em alta velocidade e globalização. A palavra **mudança**, talvez seja a mais importante palavra nesta ciência. Adaptar-se de forma ágil e eficiente às novidades que surgem a cada dia num ambiente que está em constante evolução; esta é a maior preocupação nesta nova era.

Ao longo deste trabalho, este tema foi abordado sob diversos pontos de vista: sob a *perspectiva holística*, que reconhece que o todo é maior que a soma de suas partes; sob a *visão de mercado*, que exige que as empresas sejam capazes de traçar e atingir metas que lhe assegurem vantagem competitiva diante de seus concorrentes; do ponto de vista da *melhoria*, que permite que as empresas possam se adaptar a mudanças e buscar sempre o melhor em eficiência, qualidade e produtividade; e do ponto de vista *formal*, que oferece uma base científica para o entendimento e aprimoramento do ambiente empresarial.

Estas quatro concepções da Gestão de Processos foram alinhadas em busca de se criar uma metodologia que oferecesse uma integração entre o mundo dos negócios e a precisão matemática do mundo acadêmico.

O objetivo desta pesquisa foi fornecer um embasamento para a avaliação de desempenho e melhoria de Workflow. Escolhemos para esta tarefa o formalismo conhecido como Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN). Os aspectos que motivaram a esta escolha foram:

- as redes de Petri representam naturalmente relações de ordem, causa e efeito, paralelismo e sincronização, características presentes nos desenhos de processos;
- são um formalismo que representa sistemas graficamente, ao mesmo tempo em que trazem um embasamento matemático bem definido, sendo fácil visualizar a sua relação com os processos de negócio;

- as GSPN já foram aplicadas com sucesso na avaliação de variados tipos de sistema, inclusive de manufatura;
- as GSPN são poderosas o suficiente para permitir avaliar o desempenho de sistemas de forma realista e ao mesmo tempo são simples de serem modeladas e utilizadas.

Diversas outras pesquisas utilizaram redes de Petri de alguma forma para a análise de Workflow. No Capítulo 5, as principais delas foram descritas. Uma abordagem que utilizou GSPN na década de 90 foi a de Ferscha [Fer94], mas seu modelo não está atualizado com a visão atual de Workflow, tornando-o pouco aplicável na prática. Algumas das características que fazem o modelo proposto neste trabalho diferente destas outras abordagens são discutidas a seguir.

- Os modelos WF-Net, YAWL e TWF-Net limitam o uso das redes de Petri à análise qualitativa de Workflow [AH02, AH03, LS00]. Nosso modelo permite análises tanto qualitativas quanto de desempenho;
- A SWNet, apresentada por Reijers [Rei02], fornece soluções analíticas de grande interesse e permite a representação de distribuições de probabilidade gerais para tempos, características não suportadas pelo nosso modelo. Por outro lado, ela se baseia em uma simplificação pouco realista que é a presença de recursos infinitos no sistema. A limitação de recursos, existente no cenário real, impõe uma série de dificuldades que não são tratáveis por este modelo. O nosso modelo admite que estas limitações existem e é capaz de medir o seu impacto, como exemplificado no estudo de caso;
- A *Resource-Extended SWNet* [Rei02] considera limitações de recursos, mas simplifica este problema ao assumir que cada atividade no Workflow utiliza seus próprios recursos exclusivos. Entretanto, a situação mais realista é a de que um recurso executa diversas atividades. Observamos que, quando recursos precisam ser compartilhados entre diferentes atividades, o comportamento do sistema é consideravelmente alterado. O modelo que propomos é capaz de avaliar estas condições pois não faz a mesma simplificação que o modelo de Reijers;
- A MWF-Net [LFZ04a] possui uma característica singular entre os outros modelos mencionados que é o de representar a existência de diversos processos diferentes na empresa concorrendo pelos mesmos recursos. Além disso, ela é capaz de representar todas as características de restrições de recursos mencionadas anteriormente. Por outro lado, é oferecida apenas a possibilidade de calcular um limite inferior para o desempenho do sistema, no qual tempos de espera em filas são ignorados. As filas do sistema são um dos principais fatores que influenciam no seu desempenho e são também os mais complexos de se analisar. Nosso modelo permite a medição de tempos de espera em filas e também tempos de sincronização entre atividades paralelas.

Além de todos estes pontos, verificou-se que não há um mapeamento direto entre alguns destes modelos e os conceitos de Workflow, especialmente os elementos identificados pela *Workflow Management Coalition*. Este mapeamento é contemplado no nosso modelo, sendo utilizada a mesma terminologia estabelecida pela WfMC.

Diante destas observações, acreditamos que o modelo que propomos traz relevantes contribuições para as pesquisas na modelagem e análise de Workflow.

Algumas simplificações que foram feitas na construção deste modelo são resumidas a seguir.

- tempo de execução de Atividades é independente de qual recurso particular a executa, sendo uma característica da Atividade;
- recursos iniciam uma Atividade assim que se tornam disponíveis, não sendo considerado que, na realidade, há um tempo entre a conclusão de uma Atividade e o início de uma nova por parte do recurso (*setup time*);
- clientes chegam a uma taxa constante durante toda vida do processo, quando, na verdade, é comum que sejam alternados períodos em que há maior demanda com períodos de maior ociosidade;
- probabilidades de decisões em pontos de divisão de fluxo são independentes das decisões anteriores. Ou seja, o caminho percorrido pelo *Case* até alcançar aquele ponto não influencia na decisão que será tomada. Em muitos casos reais o passado da execução, mantido pelos dados associados ao *Case*, interfere na decisão que é tomada.

Os estudos de caso realizados apresentaram duas abordagens distintas para a aplicação do modelo, ilustrando a amplitude do seu campo de atuação. No primeiro caso, a metodologia foi aplicada para melhorar o processo de uma indústria de coberturas metálicas, de forma a alinhá-lo com uma meta definida. Na segunda situação, o modelo foi utilizado para se resolver um problema de alocação de recursos em uma empresa de desenvolvimento de software.

Ambos os casos demonstram que a metodologia pode ser aplicada com sucesso para a avaliação de processos reais e que as informações fornecidas pelo modelo são de grande valor para se encontrar os pontos problemáticos do Workflow e desenvolver melhorias. Foi observado também que é importante o conhecimento do ambiente e do funcionamento da empresa durante a realização do projeto de melhoria. Por isso, é importante a cooperação e participação de gerentes e funcionários para garantir o melhor resultado.

Por fim, a metodologia proposta aqui não entra em contradição com outras utilizadas atualmente, como Seis Sigma e Produção Enxuta. Pelo contrário, pode ser utilizada como uma nova ferramenta que complementa estas abordagens.

9.1 Trabalhos Futuros

Pre vemos diversas linhas de pesquisa que podem dar continuidade a este trabalho. Destacamos algumas delas a seguir.

- a realização de um estudo comparativo desta metodologia com outros modelos em redes de Petri, para que os benefícios e limitações de cada abordagem sejam identificados. Neste aspecto, o Dr. Reijers se dispôs a colaborar com a realização deste estudo utilizando o seu próprio modelo como referência;

- a implementação de uma ferramenta de apoio à construção e avaliação dos modelos, que permita o uso desta metodologia por aqueles que não possuem afinidade com as redes de Petri. Com base nas regras apresentadas, esta ferramenta poderia gerar automaticamente uma GSPN a partir de um modelo fornecido em outra notação, como XPDL;
- além destes, também são prováveis desenvolvimentos futuros a extensão dos modelos, contemplando outros elementos do Workflow como o tratamento de eventos e outros padrões de Workflow descritos por van der Aalst [AHKB03] e a pesquisa por métodos que possam fornecer resultados para este modelo de forma analítica, ao invés de por simulação.

Apêndice A

Embasamento Matemático

Este apêndice faz uma revisão dos conceitos matemáticos básicos que são necessários para um melhor entendimento dos modelos que são apresentados ao longo da dissertação.

A.1 Teoria da Probabilidade

A.1.1 Definições

Definição A.1 (Espaço Amostral) *O espaço amostral $\Omega = \{x_1, x_2, \dots\}$ é o conjunto de todos os possíveis resultados de um experimento.*

Para cada elemento $x_i \in \Omega$, existe um valor $f(x_i)$ associado, tal que

1. $f(x) \in [0, 1], \forall x \in \Omega$;
2. $\sum_{x \in \Omega} f(x) = 1$.

Definição A.2 (Evento) *Um evento é qualquer subconjunto E do espaço amostral Ω .*

Definição A.3 (Probabilidade (caso discreto)) *Se Ω é enumerável, a probabilidade de um evento $E \subseteq \Omega$ é dada por*

$$P(E) = \sum_{x \in E} f(x) .$$

A função $f(x)$ é chamada de *função de massa de probabilidade* (*probability mass function* – pmf). Se o espaço amostral é infinito e não-enumerável, então a probabilidade não pode ser expressa em termos da pmf. Em seu lugar, utiliza-se a *função de distribuição cumulativa* (*cumulative distribution function* – cdf), indicada por $F(x)$.

A função $F(x)$ deve satisfazer as seguintes condições:

1. é monotonicamente crescente;
2. $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$;
3. $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$.

Se $F(x)$ é diferenciável, então existe uma *função de distribuição de probabilidade* (*probability distribution function* – pdf), dada por $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$.

Desta forma, para o cálculo da probabilidade num espaço contínuo utiliza-se a versão contínua da sua definição.

Definição A.4 (Probabilidade (caso contínuo)) *Se Ω é infinito e não-enumerável, a probabilidade de um evento $E \subseteq \Omega$ é dada por*

$$P(X \in E) = \int_{x \in E} dF(x) .$$

Que pode ser escrito utilizando-se a pdf, na forma

$$P(X \in E) = \int_{x \in E} f(x) dx .$$

A probabilidade em um espaço infinito não-enumerável deve respeitar as seguintes condições:

1. $P(X = x) = 0$;
2. $P(X \in \Omega) = 1$.

A.1.2 Outras Definições e Axiomas

Definição A.5 (Exclusão Mútua) *Dois eventos A e B são mutuamente exclusivos se $A \cap B = \emptyset$.*

Definição A.6 (Probabilidade do Complemento) *A probabilidade do evento \bar{A} complementar a A , é dada por*

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) .$$

Definição A.7 (Probabilidade da União) *A probabilidade de um evento $E = A \cup B$ é dada por*

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) .$$

Definição A.8 (Probabilidade de Ocorrência Conjunta) *A probabilidade da ocorrência conjunta de dois eventos independentes A e B é dada por*

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) .$$

Definição A.9 (Probabilidade Condicionada) *Dados dois eventos A e B dependentes, a probabilidade de ocorrência de B , dado que sabe-se da ocorrência de A , é calculada pela probabilidade condicionada*

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} .$$

A.2 Variáveis Aleatórias e Distribuições de Probabilidade

Uma variável aleatória (VA) [Pap91] é uma função que atribui um valor numérico a cada um dos possíveis resultados de um experimento. Ela pode assumir valores discretos ou contínuos. Por exemplo, os possíveis resultados em uma jogada de dados podem ser descritos por uma variável aleatória que assume valores discretos entre 1 e 6. Já o tempo entre a chegada de clientes em uma loja assume valores reais no intervalo de zero a infinito. A primeira variável é chamada de *variável aleatória discreta*, enquanto a segunda é chamada de *variável aleatória contínua*.

Uma variável aleatória discreta X está associada a uma função de massa de probabilidade que atribui uma probabilidade $P(X = x)$ à ocorrência de cada um dos seus possíveis valores. Se X for uma variável aleatória contínua, então associa-se a X uma função de distribuição cumulativa $F_X(x) = P(X \leq x)$. De forma geral, nos referenciamos à função que descreve as probabilidades de X como sua *distribuição de probabilidade*.

Há distribuições de probabilidade que possuem papel importante por serem úteis para a representação de inúmeros eventos do mundo real [Pap91, BGdMT98]. Algumas delas são descritas a seguir.

Importantes distribuições de probabilidade discretas:

- **Binomial** - Representa um experimento com dois possíveis resultados (0 ou 1) que é realizado n vezes, sendo cada tentativa independente da anterior e tendo probabilidade p de sucesso (resultado 1). Uma variável X representando o número de vezes em que o resultado 1 é obtido possui distribuição Binomial, cuja pmf é dada por:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, \dots, n$$

- **Geométrica** - Representa um experimento com dois possíveis resultados (0 ou 1) realizado um número indeterminado de vezes, do qual deseja-se saber qual o número de tentativas necessárias até que um resultado 1 seja obtido, tendo a probabilidade p de sucesso (resultado 1). Uma variável aleatória X que represente este número possui distribuição Geométrica, cuja pmf é dada por:

$$P(X = x) = p(1 - p)^{x-1}, \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

- **Poisson** - Representa o número de ocorrências de um evento em um certo intervalo fixo de tempo, sabendo-se a que taxa média este evento ocorre por unidade de tempo. Também pode ser aplicada a outras medidas além de tempo como distância, área ou volume. Uma variável X com distribuição de Poisson possui a pmf:

$$P(X = x) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

onde λ é a taxa de ocorrência do evento e t é o intervalo de tempo considerado.

Importantes distribuições de probabilidade contínuas:

- **Exponencial** - Representa o tempo entre a ocorrência de dois eventos consecutivos de uma variável de Poisson com taxa λ . É descrita pela pdf a seguir:

$$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

- **Hiper-exponencial** - Representa uma variável aleatória formada pela soma ponderada de variáveis exponenciais X_1, X_2, \dots, X_k com taxas $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ e pesos p_1, \dots, p_k , respectivamente. É descrita pela pdf:

$$f_X(x) = \sum_{i=1}^k p_i \mu_i e^{-\mu_i x}$$

- **Hipo-exponencial** - Representa uma soma de variáveis exponenciais X_1, X_2, \dots, X_k com pdfs f_1, f_2, \dots, f_k , respectivamente. Sua pdf é calculada por:

$$f_X(x) = f_1 * f_2 * \dots * f_k,$$

onde $*$ é a operação de convolução.

- **Erlang- k** - Consiste num caso especial da Hipo-exponencial em que as variáveis X_1, X_2, \dots, X_k possuem a mesma taxa μ . Assim, sua pdf é dada por:

$$f_X(x) = \frac{k\mu(k\mu x)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k\mu x}$$

Algumas informações que costumam ser relevantes quando estuda-se um fenômeno representado por uma variável aleatória são suas medidas de tendência central e dispersão. Dentre elas, a *média* e a *variância* são as mais utilizadas.

Definição A.10 (Média, Esperança ou Valor Esperado) *Seja X uma variável aleatória discreta, seu valor esperado é dado por:*

$$E(X) = \sum xP(X = x) .$$

Para uma variável X contínua, o seu valor esperado é dado por:

$$E(X) = \int x f_X(x) dx .$$

Definição A.11 (Variância) *Seja X uma variável aleatória, sua variância é dada por:*

$$\sigma_X^2 = Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 .$$

A medida $\sigma_X = \sqrt{Var(X)}$ é chamada de desvio padrão de X .

A.3 Processos Estocásticos

Um *processo estocástico* é uma família de variáveis aleatórias $\{X(t), t \in T\}$ definidas sobre o mesmo espaço de probabilidade, indexadas pelo parâmetro t e tomando valores em um conjunto S , chamado de *espaço de estados*. O parâmetro t em geral representa o tempo. Quando T é finito enumerável, tem-se um processo de tempo discreto. Caso contrário, o processo é dito de tempo contínuo.

A.4 Cadeias de Markov

Um *processo markoviano* é um processo estocástico que possui a propriedade *markoviana* [BGdMT98]. Esta propriedade indica que o processo é *sem memória*, de forma que as probabilidades de transição para o próximo estado dependem apenas do estado em que o processo se encontra no instante atual. Ou seja

$$P\{X(t) \leq x | X(t_n) = x_n, X(t_{n-1}) = x_{n-1}, \dots, X(t_0) = x_0\} = P\{X(t) \leq x | X(t_n) = x_n\} \quad (\text{A.1})$$

Quando o espaço de estados S é discreto, o processo é conhecido como *Cadeia de Markov (Markov Chain)* – MC. Neste trabalho estaremos restritos aos processos markovianos de estados discretos.

Se T é contínuo, a cadeia é dita *Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (Continuous Time Markov Chain)* – CTMC. Caso contrário, ela será uma *Cadeia de Markov de Tempo Discreto (Discrete Time Markov Chain)* – DTMC.

Uma cadeia de Markov pode ser vista como um processo em que o sistema permanece um tempo aleatório em cada estado, ao final do qual transiciona para um novo estado. O tempo que o processo permanece em cada estado é chamado de *tempo de permanência (sojourn time)*. Para atender à propriedade markoviana, a transição de um estado a outro não pode depender do tempo que o processo passou naquele estado. A propriedade markoviana para o tempo pode ser expressa como

$$P(T \geq t + \tau | T \geq t) = P(T \geq \tau) . \quad (\text{A.2})$$

Portanto, a distribuição do tempo de permanência em cada estado em uma cadeia de Markov deve respeitar esta condição. A única distribuição que possui esta propriedade no domínio discreto é a distribuição Geométrica e no domínio contínuo é a distribuição Exponencial. Assim, para qualquer DTMC, o tempo de permanência em um estado é geometricamente distribuído e, para qualquer CTMC, o tempo de permanência em um estado é exponencialmente distribuído.

A probabilidade $P\{X(t) = x | X(t_n) = x_n\}$ denota a probabilidade de transição da cadeia de Markov, e pode ser expressa de forma simplificada como:

$$p_{ij}(\tau) = P\{X(t + \tau) = i | X(t) = j\} . \quad (\text{A.3})$$

Para uma CTMC, as probabilidades de transição são melhor expressas pelas quantias:

$$q_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t) - \delta_{ij}}{\Delta t}, i \neq j \quad (\text{A.4})$$

$$q_{ii} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ii}(\Delta t) - 1}{\Delta t} \quad (\text{A.5})$$

A quantia q_{ij} corresponde à taxa de transição entre os estados i e j e a quantia q_{ii} corresponde à taxa com que o processo deixa o estado i .

Uma DTMC é expressa em termos da sua *matriz de transição*, dada por $P(t) = [p_{ij}(t)]$. Uma CTMC é expressa em termos da matriz $Q = [q_{ij}]$, que é chamada de *gerador infinitesimal* de $P(t)$ ou *matriz de taxa de transição*.

A.5 Teoria das Filas

Uma *fila*, em Teoria das Filas, representa um sistema em que clientes chegam para receberem serviço de uma estação de serviço [BGdMT98]. A estação de serviço pode ter um ou mais servidores idênticos, onde cada um deles presta serviço a somente um cliente por vez. Quando todos os servidores estão ocupados, os clientes que chegam são enfileirados e aguardam em um *buffer*, que pode ter tamanho finito ou infinito, até o momento em que um servidor torna-se disponível. Os clientes que têm o seu trabalho concluído liberam o servidor e partem do sistema.

A chegada de clientes e os serviços são definidos por processos estocásticos. As filas diferem basicamente em relação às características destes processos, o tamanho do buffer e número de servidores presentes. É comum definir ambos os processos, de chegada e de serviço, como sendo processos de Poisson. Neste caso, o tempo entre duas chegadas consecutivas é modelado como uma variável aleatória exponencial, o mesmo vale para o tempo de duração do serviço.

Uma fila é comumente representada por meio da notação de Kendall, que tem a seguinte forma [BGdMT98]:

A/B/m - disciplina de atendimento

Onde

- A - Indica a distribuição do tempo entre chegadas;
- B - Indica a distribuição do tempo de serviço;
- m - Indica o número de servidores ($m \geq 1$).

As distribuições são definidas usando os seguintes símbolos [BGdMT98]:

- M - Distribuição Exponencial;
- E_k - Distribuição Erlang- k ;
- H_k - Distribuição Hyperexponencial com k fases;
- C_k - Distribuição Cox com k fases;
- D - Determinística;
- G - Distribuição Geral;
- GI - Distribuição Geral com tempo entre chegadas independentes.

A disciplina de atendimento é a regra que determina quais clientes do *buffer* devem ser selecionados quando um servidor se torna disponível. Algumas disciplinas usadas normalmente são:

- FCFS (First-Come-First-Served) - Os clientes são atendidos na mesma ordem em que chegaram ao sistema. Esta é a disciplina assumida quando nenhum valor é expresso na notação de Kendall;
- LCFS (Last-Come-First-Served) - O próximo cliente a ser atendido é aquele que chegou por último no sistema;

- RR (Round Robin) - Os clientes são atendidos de acordo com a regra FCFS, porém, para cada cliente é definida uma fatia de tempo de tamanho fixo para ser atendido. Se o seu serviço não for concluído neste período, o cliente deixa o atendimento e é posto de volta no final da fila. Isto se repete até que o serviço seja terminado.

Uma fila expressa pela notação $M/D/2\text{-FCFS}$, por exemplo, corresponde a uma fila com distribuição de chegada Exponencial, distribuição de serviço determinística, dois servidores e disciplina de atendimento *First-Come-First-Served*.

As filas são utilizadas para avaliação de desempenho em uma grande variedade de aplicações. No geral, o interesse está em como o sistema se comporta em seu estado de equilíbrio (estacionário). Existe um grande número de fórmulas para se obter analiticamente medidas de desempenho em filas no estado estacionário. Soluções transientes também são encontradas para modelos de fila simples.

As medidas de desempenho mais importante para uma filas são [BGdMT98]:

Definição A.12 *Taxa de chegada λ : Taxa média em que os clientes chegam na fila.*

Definição A.13 *Taxa de serviço μ : Taxa média em que um servidor é capaz de concluir tarefas de clientes.*

Definição A.14 *Vazão γ (throughput): A partida de clientes da fila. O termo vazão pode indicar tanto o processo de saída em si como apenas a taxa média de saída.*

Um teorema importante relacionada à vazão em uma fila é o *Teorema de Burke*. Este afirma que qualquer fila com chegada exponencial e tempo de serviço exponencial terá um processo de Poisson na saída com a mesma taxa do processo de chegada.

Definição A.15 *Utilização ρ : Em filas com servidores únicos, a utilização corresponde à fração de tempo em que os servidores estão ocupados. Neste caso, este valor é dado por:*

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (\text{A.6})$$

No caso em que há múltiplos servidores, a utilização é dada por:

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} \quad (\text{A.7})$$

É condição para que o estado de equilíbrio exista que a utilização seja $\rho < 1$.

Definição A.16 *$P(n = k)$: Probabilidade do número de clientes no sistema, no estado de equilíbrio, ser igual a k .*

Definição A.17 *$E(n)$: Número médio de clientes no sistema.*

Definição A.18 *$E(n_q)$: Número médio de clientes no buffer aguardando por serviço (tamanho da fila).*

Definição A.19 *Tempo de Espera W : Tempo gasto pelo cliente aguardando por serviço. Esta é uma variável aleatória com valor médio $E(W)$ e função de distribuição de probabilidade $f_W(x)$.*

Definição A.20 *Tempo de Resposta R : Tempo total gasto pelo cliente no sistema. Esta é uma variável aleatória, com valor médio $E(R)$ e função de distribuição de probabilidade $f_R(x)$.*

Note que

$$E(R) = E(W) + \frac{1}{\mu} \quad (\text{A.8})$$

Nós também podemos calcular o valor de $E(R)$ e $E(W)$ aplicando a *Lei de Little*:

$$E(R) = \frac{E(n)}{\lambda} \quad (\text{A.9})$$

$$E(W) = \frac{E(n_q)}{\lambda} \quad (\text{A.10})$$

Esta lei é válida para qualquer sistema em que o número de clientes que entra no sistema é igual ao número que sai, não havendo o surgimento ou desaparecimento de clientes no seu interior.

A.6 Redes de Petri

As redes de Petri são um formalismo matemático que permite representar sistemas dinâmicos em que há relações de causa e efeito complexas, concorrência e sincronização. Elas foram criadas em 1962 por Carl Adam Petri [Pet62].

A rede de Petri é um grafo direcionado em que há dois tipos de nós: lugares, representados por círculos, e transições, representadas por barras ou retângulos. Os lugares podem conter *tokens*, que são representados por círculos pretos dentro do lugar.

A Fig. A.1 apresenta um exemplo simples de rede de Petri, em que é modelado o ciclo dia e noite. Quando um *token* é colocado no lugar *Dia*, significa que o sistema está no estado *Dia*. Isto *habilita* a transição *Anoitecer* a ocorrer. Quando esta transição *dispara*, o *token* é removido do lugar *Dia* e um *token* é colocado no lugar *Noite*, indicando que o sistema está neste estado. Isto, por sua vez, *desabilita* a transição *Anoitecer* e *habilita* a transição *Amanhecer*.

De forma análoga, o disparo da transição *Amanhecer* faz com que o *token* seja removido do lugar *Noite* e um *token* seja colocado no lugar *Dia*.

A definição formal da rede de Petri é apresentada a seguir.

Definição A.21 (Rede de Petri) *Uma Rede de Petri (PN ou P/T-net) é uma 5-tupla definida como $PN = (P, T, I, O, M_0)$, onde:*

- P é o conjunto de lugares;
- T é o conjunto de transições, $P \cap T = \emptyset$;
- $I, O : (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ são as funções de entrada e de saída, respectivamente, que definem os arcos da rede;

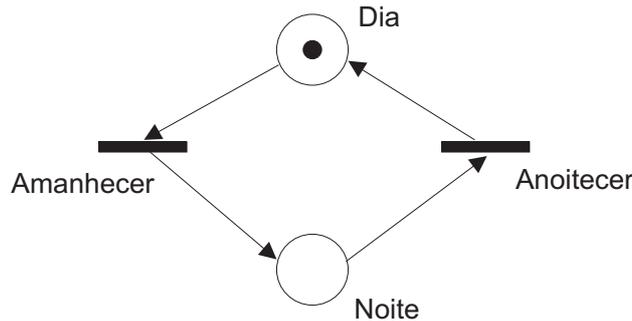


Figura A.1: Exemplo de rede de Petri

- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de marcação inicial, que atribui um número inteiro de tokens a cada lugar.

O modelo de rede de Petri pode ser estendido pela adição de arcos inibidores, que elevam o seu poder computacional para o de uma máquina de Turing. Os arcos inibidores são representados por uma função $H : (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$.

O estado de uma rede de Petri é definido por sua *marcação*. Uma marcação é uma função $M : P \rightarrow \mathbb{N}$, a qual indica o número de tokens presente em cada lugar da rede. Uma transição está *habilitada* em uma dada marcação de acordo com a regra de habilitação a seguir.

Definição A.22 (Regra de Habilitação) Uma transição $t \in T$ está habilitada na marcação M SSE:

- $\forall p \in I(t), M(p) \geq I(t, p)$, e
- $\forall p \in H(t), M(p) < H(t, p)$ ou $M(p) = 0$.

O comportamento dinâmico de uma rede de Petri é governado pela *regra de disparo*. Somente transições habilitadas podem disparar. O disparo de uma transição habilitada remove tokens de todos os seus lugares de entrada e gera tokens em cada um de seus lugares de saída.

Definição A.23 (Regra de Disparo) O disparo da transição t , habilitada na marcação M , conduz a uma nova marcação M' tal que

$$\forall p \in I(t) \cup O(t), \quad M'(p) = M(p) - I(t, p) + O(t, p).$$

A notação $M_i[t]M_j$ é normalmente utilizada para indicar que M_j pode ser *diretamente alcançável* a partir de M_i , através do disparo da transição t .

Definição A.24 (Conjunto Alcançabilidade) O conjunto de todas as marcações que podem ser alcançadas a partir da marcação M_0 , depois do disparo de uma ou mais transições, é chamado de conjunto de alcançabilidade e é denotado por $RS(M_0)$.

Definição A.25 (Pré-condição) O conjunto de todos os lugares p tais que $I(t, p) > 0$, denotado por $I(t)$ ou $\bullet t$, é chamado de pré-condição de t .

Definição A.26 (Pós-condição) *O conjunto de todos os lugares p tais que $O(t, p) > 0$, denotado por $O(t)$ ou t^\bullet , é chamado de pós-condição de t .*

De forma análoga, a pré-condição de um lugar p é o conjunto de todas as transições t , tais que $O(t, p) > 0$ e a pós-condição de p é o conjunto de todas as transições t , tais que $I(t, p) > 0$.

Definição A.27 (Conjunto Inibidor) *O conjunto de todos os lugares p , tais que $H(t, p) > 0$, denotado por $H(t)$ ou t° , é chamado conjunto inibidor de t .*

Definição A.28 (Boundedness) *Uma rede de Petri é dita ser k -bounded se o número de tokens em qualquer lugar nunca for maior que k , $k > 0$. Se qualquer lugar puder ter um infinito número de tokens, a rede é dita ser unbounded.*

Definição A.29 (Safeness) *Uma rede de Petri é Safe se ela é 1-bounded, ou seja, a marcação máxima de todos os lugares é 1.*

Definição A.30 (Liveness) *Uma rede é dita Live se, para todas as transições t , é possível alcançar, a partir de qualquer estado, um estado em que t seja habilitada.*

A.7 Outros Tipos de Redes de Petri

Diversas variações e extensões para as redes de Petri foram propostas ao longo dos anos. Cada uma delas possui propriedades que as tornam mais ou menos apropriadas para uma dada aplicação. As redes de Petri mais utilizadas são:

- Redes de Petri Temporizadas (*Time Petri Nets* (TPN)) – Associam tempos a cada transição, permitindo avaliar o comportamento do sistema ao longo da linha do tempo. Os tempos são determinísticos ou intervalares;
- Redes de Petri Estocásticas (*Stochastic Petri Nets* (SPN)) – Associam tempos a cada transição na forma de variáveis aleatórias;
- Redes de Petri Coloridas (*Coloured Petri Nets* (CPN)) – Associam estruturas de dados a cada *token* e permitem a utilização de expressões matemáticas para manipular estes dados ao longo da execução da rede. Esse tipo de rede também é chamado de *redes de Petri de alto-nível*.

A.8 Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN)

As Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (*Generalized Stochastic Petri Nets* – GSPN) [MBea95], permitem a utilização de transições temporizadas estocásticas em conjunto com transições não-temporizadas (chamadas *imediatas*). Esta característica facilita a modelagem de transições lógicas, que não estão associadas a tempo. Transições temporizadas apenas são habilitadas quando não há mais nenhuma transição imediata habilitada. Marcações em que transições imediatas estão habilitadas são chamadas de *não-tangíveis* (*vanishing*). Marcações em que transições temporizadas estão habilitadas são chamadas de *tangíveis* (*tangible*).

É possível provar que as GSPNs são isomórficas às SPNs.

Definição A.31 (Rede de Petri Estocástica Generalizada) *Uma Rede de Petri Estocástica Generalizada (GSPN) é uma 7-tupla definida como*
 $GSPN = (P, T, \Pi, I, O, H, M_0, W)$, onde:

- P é o conjunto de lugares;
- T é o conjunto de transições temporizadas e imediatas, $P \cap T = \emptyset$;
- $\Pi : T \rightarrow \mathbb{N}$ é uma função prioridade, onde:

$$\Pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } t \text{ é uma transição imediata;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

- $I, O, H : (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ são as funções de entrada, de saída e inibidora, respectivamente;
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de marcação inicial;
- $W : (T \times (P \rightarrow \mathbb{N})) \rightarrow \mathbb{R}_+^*$ é a função peso, a qual representa o peso (w_t) das transições imediatas e a taxa (λ_t) de transições temporizadas. Estes valores podem ser dependentes da marcação M_i de uma rede.

Uma vez que o disparo de transições temporizadas em uma GSPN é um evento em um processo estocástico de tempo contínuo, a probabilidade de dois disparos dessas transições ocorrerem ao mesmo tempo é zero.

Uma outra característica de uma GSPN está relacionada ao seu comportamento quando múltiplos tokens habilitam uma transição, permitindo a ocorrência de mais de um disparo desta transição. Isto ocorre quando o número de tokens na pré-condição é N vezes aquele mínimo necessário para habilitá-la. Nesta situação, é dito que a transição está habilitada com *grau* igual a N . Com relação a isto, uma transição pode comportar-se de acordo com um destas três semânticas:

- semântica servidor-único - A transição precisa disparar antes de ser habilitada de novo. Assim, ela dispara N vezes seqüencialmente, iniciando o tempo para cada *token* após o disparo do anterior.
- semântica servidor-infinito - A transição é habilitada N vezes em paralelo. Assim, o tempo para disparo de todos os *tokens* é iniciado simultaneamente.
- semântica servidor- k - A transição é habilitada até k vezes em paralelo. Tokens que habilitam a transição com um grau maior que k são considerados apenas depois do disparo dos primeiros k .

A.9 Análise da GSPN

Uma GSPN é isomórfica a uma Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CTMC). Isto implica que qualquer método de avaliação de desempenho de CTMCs também pode ser usado para avaliar GSPNs [MBea95]. A CTMC equivalente a uma GSPN é obtida da seguinte forma:

1. O conjunto de estados $S = \{S_i\}$ da CTMC corresponde ao conjunto alcançabilidade da GSPN $RS(M_0)$.

2. A taxa de transição de S_i para S_j é a soma das taxas de disparo de todas as transições que levam da marcação M_i para a marcação M_j , expresso por:

$$q_{ij} = \sum_{t_k \in E_j(M_i)} w_k ,$$

onde $E_j(M_i) = \{ t \mid M_i[t]M_j \}$.

Medidas de desempenho da GSPN são geralmente extraídas do estado de equilíbrio da sua cadeia de Markov correspondente. Análises transientes também podem ser feitas para extrair valores em um certo intervalo de tempo.

A solução estacionária de uma GSPN corresponde ao tempo relativo que o sistema gasta em cada marcação. Em outras palavras, a distribuição de probabilidade do sistema estar em uma marcação. O vetor estado estacionário é denotado por $\eta = \{\eta_i\}$, onde η_i é a probabilidade no equilíbrio do sistema se encontrar na marcação M_i .

O vetor estado estacionário é a base para a avaliação quantitativa do comportamento da GSPN, que é expresso em termos de índices de desempenho. Funções de índice apropriadas, denotadas por funções de ganho - $r(M)$, são definidas para o cálculo destes índices. Funções de ganho são definidas sobre as marcações da GSPN. O valor médio de um índice é obtido a partir da distribuição de probabilidade do estado estacionário, de acordo com a seguinte soma ponderada:

$$R = \sum_{M_i \in RS(M_0)} r(M_i)\eta_i . \quad (\text{A.11})$$

Uma medida comum a ser obtida é a probabilidade de certas condições Υ ocorrerem. Seja $\Upsilon(M)$ uma função tal que seu valor seja *true* se a condição é satisfeita na marcação M e *false* caso contrário. A função ganho para calcular a probabilidade da condição Υ é:

$$r(M) = \begin{cases} 1 & \text{se } \Upsilon(M) = \textit{true} \\ 0 & \text{caso contrário} . \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Uma outra medida importante é o *throughput* de uma transição, que é a taxa em que ela dispara efetivamente no estado de equilíbrio. Este valor é calculado usando a seguinte função:

$$\gamma(t) = \sum_{M_i | t \in E(M_i)} \eta_i W(t, M_i) , \quad (\text{A.13})$$

onde $E(M_i)$ é o conjunto das transições habilitadas na marcação M_i .

Referências

- [Aal98] W.M.P. van der Aalst. The Application of Petri Nets to Workflow Management. *The Journal of Circuits, Systems and Computers*, 8(1):21–66, 1998.
- [AH02] W.M.P. van der Aalst and K.M. van Hee. *Workflow Management: Models, Methods, and Systems*. MIT press, Cambridge, MA, 2002.
- [AH03] W.M.P. van der Aalst and A.H.M. ter Hofstede. YAWL: Yet another workflow language (revised version). QUT Technical report, FIT-TR-2003-04, Queensland University of Technology, Brisbane, 2003.
- [AHKB03] W.M.P. van der Aalst, A.H.M. ter Hofstede, B. Kiepuszewski, and A. P. Barros. Workflow patterns. *Distributed and Parallel Databases*, 14(1):5–51, 2003.
- [Ash70] W. Ross Ashby. *Introdução à Cibernética*. Editora Perspectiva, São Paulo, 1970.
- [BCB89] Steven C. Bruell, Pozung Chen, and Gianfranco Balbo. Alternative methods for incorporating non-exponential distributions into stochastic timed petri nets. In *PNPM*, pages 187–197. IEEE Computer Society, 1989.
- [Bee69] Stafford Beer. *Cibernética e Administração Industrial*. Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1969.
- [Bee81] Stafford Beer. *Brain of the Firm*. John Wiley & Sons, second edition, 1981.
- [BGdMT98] Gunter Bolch, Stefan Greiner, Hermann de Meer, and Kishor S. Trivedi. *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, New York, August 1998.
- [BPT07] BPTrends. A Detailed Analysis of BPM Suites. Technical report, Business Process Trends, 2007.
- [CA07] Bill Curtis and John Alden. The Business Process Maturity Model (BPMM) : What, why and how. Technical report, Business Process Trends, 2007.
- [Cap03] Fritjof Capra. *A Teia da Vida : Uma Nova Compreensão Científica dos Sistemas Vivos*. Cultrix, São Paulo, 2003.

- [CMM] CMMI Product Team. CMMI for Development, version 1.2.
- [Coa95] Workflow Management Coalition. WfMC standards: The workflow reference model, version 1.1., 1995.
- [Coa99] Workflow Management Coalition. Workflow management coalition terminology and glossary, version 3.0 (WFMC-TC-1011). Technical report, Workflow Management Coalition, Brussels, 1999.
- [Fer94] A. Ferscha. Qualitative and quantitative analysis of business workflows using generalized stochastic petri nets, 1994.
- [GKZH95] Reinhard German, Christian Kelling, Armin Zimmermann, and Günter Hommel. TimeNET: A toolkit for evaluating non-markovian stochastic petri nets. *Perform. Eval*, 24(1-2):69–87, 1995.
- [HB07] C. Herron and P. M. Braident. Defining the foundation of lean manufacturing in the context of its origins (japan). In *Proceedings of the 2007 International Conference on Agile Manufacturing*, pages 148–157. IEEE Computer Society, 2007.
- [HpR03] Paul Harmon and Geary A. (pról.) Rummler. *Business Process Change : A Manager's Guide to Improving, Redesigning, and Automating Processes*. Morgan Kaufmann, San Francisco, EUA, 2003.
- [HW08] Paul Harmon and Celia Wolf. The state of business process management : February 2008. Technical report, Business Process Trends, 2008.
- [JN06] John Jeston and Johan Nelis. *Business Process Management : Practical Guidelines to Successful Implementations*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2006.
- [Kak00] Michio Kaku. *Hiperespaço : Uma Odisséia Científica Através de Universos Paralelos, Empenamentos do Tempo e a Décima Dimensão*. Rocco, Rio de Janeiro, 2000.
- [LFZ04a] JianQiang Li, Yushun Fan, and MengChu Zhou. Performance modeling and analysis of workflow. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 34(2):229–242, 2004.
- [LFZ04b] JianQiang Li, Yushun Fan, and MengChu Zhou. Timing constraint workflow nets for workflow analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 33(2):179–193, 2004.
- [LS00] Sea Ling and H. Schmidt. Time Petri Nets for workflow modelling and analysis. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 4, pages 3039–3044, Nashville, TN, USA, October 2000. IEE Press.
- [MBea95] M. Ajmone Marsan, G. Balbo, and G. Conte et al. *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. Wiley series in parallel computing. Wiley, New York, 1995.

- [MR93] Menish Malhotra and Andrew Reibman. Selecting and implementing phase approximations for semi-markov models. *Stochastic Models*, 9(4):473–506, 1993.
- [MR04] Selma Limam Mansar and Hajo A. Reijers. Best practices in business process redesign: Survey results amongst dutch and uk consultants. In *Proceedings of the 2004 International Conference on Innovations in Information Technology*, pages 413–420, Dubai, UAE, oct 2004. UAE University.
- [MR05] Selma Limam Mansar and Hajo A. Reijers. Best practices in business process redesign: validation of a redesign framework. *Comput. Ind.*, 56(5):457–471, 2005.
- [NAR05] M. Netjes, W.M.P. van der Aalst, and H. A. Reijers. Analysis of resource-constrained processes with colored petri nets. In K. Jensen, editor, *Proceedings of the Sixth Workshop on the Practical Use of Coloured Petri Nets and CPN Tools (CPN 2005)*, volume 576 of *DAIMI*, pages 251–266, Aarhus, Denmark, October 2005. University of Aarhus.
- [Pap91] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 3rd edition, 1991.
- [PCCW93] Mark C. Paulk, Bill Curtis, Mary Beth Chrissis, and Charles V. Weber. Capability maturity model for software (version 1.1). Technical report, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh , PA , USA, 1993.
- [Pet62] C. A. Petri. *Kommunikation mut Automaten*. PhD thesis, Schriften des IIM Nr. 2, Bonn, 1962.
- [Por85] Michael E. Porter. *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. The Free Press, New York, 1985.
- [Pro05] Project Management Institute. *Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (PMBOK), Terceira Edição*. Project Management Institute, 2005.
- [Pzy03] Thomas Pzydek. *The Six Sigma Handbook : The Complete Guide for Greenbelts, Blackbelts and Managers at All Levels, Revised and Expanded Edition*. McGraw-Hill, USA, 2003.
- [Rei02] H. Reijers. *Design and Control of Workflow Processes: Business Process Management for the Service Industry*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2002.
- [vdAADtH04] Wil van der Aalst, Lachlan Aldred, Marlon Dumas, and Arthur ter Hofstede. Design and implementation of the YAWL system. Technical report, Queensland University of Technology, 2004.

- [WCG07] Charles V. Weber, Bill Curtis, and Tony Gardiner. Business Process Maturity Model : Request for comment (RFC), version 3. Technical report, Object Management Group, 2007.
- [WFM02] WFMC. Workflow management coalition workflow standard: Workflow process definition interface – XML process definition language (XPDL) (WFMC-TC-1025). Technical report, Workflow Management Coalition, Lighthouse Point, Florida, USA, 2002.
- [Whi06] Stephen A. White. Introduction to bpmn. Technical report, IBM Software Group, 2006.
- [zur02] Michael zur Muehlen. *Workflow-Based Process Controlling : Foundation, Design, and Application of Workflow-driven Process Information Systems*. Logos Verlag, Berlin, 2002.