



**Ronaldo Pedro da Silva**

**Simulação e Análise do Desempenho de  
um Laboratório Analítico em um Cenário  
Auto-sustentável**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Industrial do  
Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Eugenio Kahn Epprecht

Rio de Janeiro

Abril de 2007



**Ronaldo Pedro da Silva**

**Simulação e Análise do Desempenho de  
um Laboratório Analítico em um Cenário  
Auto-sustentável**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Eugenio Kahn Epprecht**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Leonardo Junqueira Lustosa**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Roberto Ribeiro de Avillez**

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## Ronaldo Pedro da Silva

Graduou-se em Administração de Empresas no IAG/PUC-Rio em 2004. Trabalhou cerca de 23 anos em ambiente de pesquisa (Centro de Pesquisas da CSN e DCMM/PUC-Rio). Concebeu, em 1997 no Instituto Gênese, uma empresa *spin-off* de treinamento em equipamentos e processos com simulação multimídia. Publicou trabalhos em congressos e revistas de caracterização de materiais, engenharia de produção e administração (Brazilian Society for Electron Microscopy, 2001; VIII Latin American Seminar on X-Ray Analysis Techniques-SARX, 2002; Acta Microscopia, 2002; dois artigos no XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2005 e Revista de Economia e Administração IBMEC, 2006). Atualmente é Supervisor do LabDRX/DCMM/PUC-Rio.

### Ficha Catalográfica

Pedro-Silva, Ronaldo

Simulação e análise do desempenho de um laboratório analítico em um cenário auto-sustentável / Ronaldo Pedro-Silva ; orientador: Eugenio Kahn Epprecht. – 2007.

129 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Simulação. 3. Laboratório analítico. 4. Difração de raios-X. 5. Gestão de laboratórios de P&D. 6. Auto-sustentável. I. Epprecht, Eugenio Kahn. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Dedico este trabalho a minha querida esposa, Elvira, como ínfima parcela do reconhecimento por tudo que fez e faz por nossos filhos, Júlia e Pedro, e pela minha vida pessoal e profissional. Obrigado por me fazer e deixar sonhar...

## Agradecimentos

A Deus, pela existência, oportunidades e saúde;

Ao meu orientador Professor Eugenio Kahn Epprecht, pela objetividade, franqueza, parceria e, principalmente, pela revisão detalhada de todo conteúdo desta dissertação, bem como a confiança depositada na estruturação desta pesquisa;

Ao Professor Roberto Ribeiro de Avillez, pela total liberdade no uso de dados e informações do LabDRX e, particularmente, pela flexibilidade, oportunidades de estudos e aprendizado ao longo destes 10 anos de trabalho na PUC-Rio. Parece se repetir à história entre dois homens, Manuel Bandeira e um jovem chamado Avillez;

A Companhia Siderúrgica Nacional, pelo acesso e utilização do Arena versão 10.0 profissional e, em particular, ao meu tutor neste software, o Eng. Bruno Calazans, pela paciência e disponibilidade;

A minha amiga Professora Terezinha Ferreira de Oliveira, pelas palavras de incentivo e pelo fundamental apoio na fase preliminar do mestrado;

A Professora Maria Angela de Campelo Melo e Professor Nélio Domingues Pizzolato, pela receptividade e orientação na matrícula;

Ao Professor Augusto Sampaio e a Coordenação Central de Pós-Graduação e Pesquisa da PUC-Rio, pela bolsa de isenção VRAC I;

Ao Dr. Valter Rocha dos Santos, pelos conselhos e generosa transmissão de experiências durante o cafezinho diário, além das cobranças “A dissertação está pronta?”;

Ao Professores Paulo Dalcol e Fernando Rizzo, pelas orientações acadêmicas e aos colegas funcionário do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio Cláudia, Izabel, Fernanda, Eduardo, Celi e Gilvan, além de todos colegas de trabalho do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio;

Aos amigos do Mestrado: Daniel, Leo, Thiago, Wellington, Jaci, Rosana, Eduardo, Arnaldo, José, Silvio, e, em especial, a Yuri, Tiago, Bruno Estatístico, Bruno, Cristina, Danilo, Ulisses e Aninha “E o churrasco, galera?”, além de muitos outros amigos das turmas de 2005 e 2006;

A minha querida esposa, Elvira, pela enorme apoio, incentivo e paciência. Pode marcar a viagem, pois desta vez eu vou;

Aos melhores filhos do mundo, Pedro e Júlia, pelos momentos de carinho, alegria e diversão.

A amiga Márcia Alonso, pelos inúmeros auxílios e apoio aos estudos de Júlia que, indiretamente, contribuíram com este;

A minha querida e vitoriosa mãe, Tereza Vicença Viana, meus queridos irmãos Marzim e Sandra e a “grande família”: Mário, José Horta, Abílio, Patrícia, Kelen, Marcelo, Eleandro, Victor, Jadir, Keite, Jesus, Rosa, Eliane, Tiago, Karen, Junior, Fernanda, Izabel, Guedes, vovô Nemésio e vovó Oliva.

## Resumo

Pedro-Silva, Ronaldo; Epprecht, Eugenio Kahn (Orientador). **Simulação e Análise do Desempenho de um Laboratório Analítico em um Cenário Auto-sustentável**. Rio de Janeiro, 2007. 129p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os laboratórios analíticos de universidades e instituições de pesquisa privadas sem fins lucrativos estão expostos a um ambiente competitivo bem como à descontinuidade e contingenciamento de recursos financeiros oferecidos pelos órgãos de fomento. Objetivando a auto-sustentabilidade operacional, esses laboratórios estão buscando fontes de recursos próprios com a oferta crescente de prestação de serviços especializados a diferentes setores industriais. Contudo, as atividades de prestação de serviço são distintas quando comparadas às atividades de P&D&I, pois as primeiras são caracterizadas pela necessidade imediata ou de curto prazo e as últimas são caracterizadas pelo longo prazo. Neste contexto, torna-se necessário avaliar o *trade-off* entre ambientes competitivos e cooperativos (serviços e pesquisa) e estabelecer estratégias competitivas sustentáveis, além de práticas e técnicas de gestão que garantam a eficiência operacional sem prejuízo da qualidade e do nível de atendimento do laboratório analisado. O objetivo geral deste trabalho é, portando, analisar o desempenho do LabDRX da PUC-Rio em um cenário auto-sustentável através de um modelo de simulação de eventos discretos. Conclui-se que em tal cenário o desempenho do Laboratório atende a política de atendimento acordada com as categorias de clientes, desde que se faça a implementação conjunta de limitação dos pedidos de urgência na disciplina de fila do sistema e do aumento de capacidade com uma proposta de inovação em processo, o *Distance Rietveld*. A metodologia apresentada neste trabalho pode ser adaptada para outros laboratórios semelhantes que procurem sustentabilidade operacional através de prestação de serviços tecnológico para indústria.

## Palavras-chaves

Simulação; laboratório analítico; difração de raios-X; gestão de laboratórios de P&D; auto-sustentável.

## Abstract

Pedro-Silva, Ronaldo; Epprecht, Eugenio Kahn (Advisor). **Simulation and Analysis of the Performance of an Analytical Laboratory in a Self-sustaining Scenario**. Rio de Janeiro, 2007. 129p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Private non-profit universities and research institutes have their analytical laboratories exposed to a competitive environment, as well as to discontinuity and limitation of financial resources offered by funding agencies. Aiming to operational self-sustainability, these laboratories are searching complementary resources by increasing the offer of specialized services to different industrial sectors. However, service activities are distinct from R&D&I activities, because the former are characterized by immediate or short-term need and the latter, by long-term need. In this context, it becomes necessary to evaluate the trade-off between competitive and cooperative environments (services and research), and to establish sustainable competitive strategies, as well as management practices and techniques that assure operational efficiency without quality losses or decrease in the service level. The objective of this work is, therefore, to analyze the performance of LabDRX at PUC-Rio in a self-sustainable scenario through discrete-event simulation. It was found that, in the self-sustainable scenario considered, the performance of the Laboratory satisfies the contracting policy agreed with the customer categories, as long as one makes simultaneous implementation of a limited urgent queue discipline and a capacity increase through an innovation proposal: *Distance Rietveld*. The methodology presented in this work can be adapted for many other similar laboratories searching for operational sustainability by offering technological services to industry.

## Keywords

Simulation; analytical laboratory; X-ray diffraction; management of R&D laboratories; self-sustaining.

## Sumário

1. Introdução	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Objetivos geral e específicos	18
1.3. Delimitações do estudo	18
1.4. Relevância da pesquisa	19
1.5. Estrutura da dissertação	20
1.6. Terminologia	21
2. Reflexões sobre a Estrutura do Setor das Universidades e Instituições Privadas de P&D&I	23
2.1. Novos entrantes	25
2.2. Rivalidade entre concorrentes existentes	26
2.3. Pressões de produtos e serviços substitutos	28
2.4. Poder de negociação dos fornecedores	28
2.5. Poder de negociação dos compradores	29
2.6. Posicionamento estratégico da UIPs	29
2.7. Comentários finais	32
3. Demanda por Serviços Tecnológicos	33
3.1. Fatores econômico-financeiros	33
3.2. Fatores sócio-ambientais	34
3.3. Fatores políticos-legais	35
3.4. Fatores tecnológicos	35
3.5. Prestação de serviços tecnológicos vs atividades de P&D&I	37
3.6. Dificuldades na contratação de serviços tecnológicos	38
4. Aplicações Industriais de Difração de Raios-X	40
4.1. Difração de raios-X	40
4.2. Fontes de radiação e de difração de raios-X	41
4.3. A banalização das ferramentas de pesquisa	43
4.4. Método de Rietveld	45
4.5. Aplicações industriais	46
4.6. Considerações finais	51
5. Modelo de Simulação	52
5.1. LabDRX – Laboratório de Difração de Raios-X	52
5.2. Demanda corrente e categorias de clientes	54
5.3. Diagrama de Ciclo de Atividades do LabDRX	58
5.4. Custos e ponto de equilíbrio operacional do LabDRX	60
5.5. Coleta de dados	63
5.6. Análise e tratamento dos dados	65
5.6.1. Outliers	65
5.6.2. Análise de correlação	67
5.6.3. Identificação e seleção das distribuições para o modelo	68

5.7. Construção e descrição do modelo de simulação	70
5.8. Verificação	77
5.9. Validação	78
5.10. Descrição dos cenários	88
5.10.1. Cenário atual	89
5.10.2. Cenário pessimista	90
5.10.3. Cenário otimista	90
5.10.4. Cenário “aumento de capacidade”	91
5.10.5. Um cenário inovador, o <i>Distance Rietveld</i>	92
5.10.6. Cenário “urgência limitada”	95
5.10.7. Considerações no cálculo da taxa de utilização	96
6. Análise dos Resultados	100
7. Conclusões e Sugestões	106
7.1. Conclusões	106
7.2. Sugestões	109
Bibliografia	111
Anexo A - Formulário para Coleta de Dados	116
Anexo B - Distribuições	117
Anexo C – Verificação do Modelo	118
Apêndice I – Algoritmo Simplificado do Modelo Sistema LabDRX	119

## Lista de tabelas

Tabela 1: Orçamento dos Fundos Setoriais (MCT): Reserva de Continência, 2003 a 2006	24
Tabela 2: Dificuldades na Contratação de Serviços Tecnológicos	38
Tabela 3: Crescimento nos Investimentos Mapeados (2007-2010/2002-2005)	51
Tabela 4: Pedido de urgência por categoria de clientes do LabDRX	56
Tabela 5: Política de prioridades do LabDRX	57
Tabela 6: Avaliação do impacto de retirada do outlier	66
Tabela 7: Comparação das médias e desvio padrão dos dados de 2005 e 2006	66
Tabela 8: Distribuições das variáveis de entrada	69
Tabela 9: Determinação da precisão dos parâmetros de desempenhos globais	82
Tabela 10: Validação da simulação do cenário atual	84
Tabela 11: Validação do cenário atual com teste de hipótese	85
Tabela 12: Política de atendimento por categoria de cliente em dias corridos	87
Tabela 13: Cenário atual	90
Tabela 14: Cenário pessimista	90
Tabela 15: Cenário otimista	91
Tabela 16: Cenário capacidade aumentada	92
Tabela 17: Cenário <i>Distance Rietveld</i>	95
Tabela 18: Cenário urgência limitada	96

## Lista de figuras

Figura 1: Natureza Jurídica das Instituições Ofertantes de Serviços Tecnológicos	20
Figura 2: Evolução das Exportações Brasileiras: 1996 a 2006	34
Figura 3: Difração de raios-X (a) interferência construtiva (b) interferência destrutiva	40
Figura 4: Diagrama do Luz Síncrotron	42
Figura 5: Mercado Brasileiro de Catalisadores FCC – de Leito Fluidizado e HDR – Hidrorefino	49
Figura 6: Aplicação da difração de raios-X na caracterização de nanotubos de titanato: (a) difratogramas de TiTanate Nano Tubos/sódio Hexatitanato (TTNT/H), (b) Imagem de uma amostra de nanotubo de titanato (TTNT/H) a 200°C	50
Figura 7: Número de análises realizadas e nos últimos 5,5 anos no LabDRX	54
Figura 8: Número de análise solicitadas ao LabDRX nos últimos 2 anos	55
Figura 9: Diagrama de Ciclo de Atividade do Sistema LabDRX	58
Figura 10: Demanda corrente do sistema LabDRX	64
Figura 11: Gráfico box-plot para identificação de <i>outliers</i> .	65
Figura 12: Gráfico de Dispersão para Verificação da Presença de Autocorrelação de 1 Período (“lag 1”) de Cada uma das 4 Variáveis de Interesse	67
Figura 13: Modelo do Sistema LabDRX	71
Figura 14: Submodelo Controle do Relógio	71
Figura 15: Submodelo Chegada de Requisições	72
Figura 16: Submodelo Características dos Clientes	73
Figura 17a: Submodelo Difrátômetro de Raios-X	74
Figura 17b: Submodelo Difrátômetro de Raios-X (continuação)	75
Figura 17c: Submodelo Difrátômetro de Raios-X (continuação)	75
Figura 18: Submodelo Análise Qualitativa e Quantitativa	76
Figura 19: Submodelo <i>Lead Time</i>	77
Figura 20: Evolução da Taxa de Utilização do DRX (Goniômetro 1) em uma Simulação Piloto com 5 Replicações de 8760 horas cada, para Identificação do Período de <i>Steady-State</i> e <i>Warm-up</i> de 500 horas (aprox.: 20 dias)	80
Figura 21: Planejamento da simulação de cenários	89
Figura 22: Diagrama de Ciclo de Atividade do Sistema LabDRX com <i>Distance Rietveld</i> e <i>Rietveld on-line</i>	94
Figura 23: Comparação da taxa de utilização do difratômetro de raios-X ( $\rho$ ) com a demanda prospectiva para cada cenário.	98
Figura 24: Relacionamento entre taxa de utilização do serviço e a qualidade do serviço	99
Figura 25: Desempenho do sistema LabDRX diante da categoria de clientes outras instituições de P&D&I.	101
Figura 26: Desempenho do sistema LabDRX diante da categoria de clientes outros departamentos da PUC-Rio	101

Figura 27: Desempenho do sistema LabDRX diante da categoria de clientes DCMM	102
Figura 28: Desempenho do sistema LabDRX diante da categoria de clientes empresas	103
Figura 29: Desempenho do sistema LabDRX diante dos pedidos de urgência de todas as categoria de clientes	104
Figura 30: Efeito da urgência limitada na categoria de clientes	105

Science would soon come to a standstill if all scientists were of the same intellectual type. Science needs scholars with many different talents.

Max von Laue, Fifty years of X-ray Diffraction