



TESE DE DOUTORADO

**INVESTIGANDO A INTERAÇÃO ENTRE PROGNÓSTICO E
GERENCIAMENTO DA SAÚDE E SISTEMA PRODUTO
SERVIÇO PARA O SUPORTE DE DECISÕES OPERACIONAIS**

EVANDRO LEONARDO SILVA TEIXEIRA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**INVESTIGANDO A INTERAÇÃO ENTRE PROGNÓSTICO E
GERENCIAMENTO DA SAÚDE E SISTEMA PRODUTO
SERVIÇO PARA O SUPORTE DE DECISÕES OPERACIONAIS**

EVANDRO LEONARDO SILVA TEIXEIRA

ORIENTADOR: SADEK CRISOSTOMO ABSI ALFARO

TESE DE DOUTORADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.TD – 01A/12

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INVESTIGANDO A INTERAÇÃO ENTRE PROGNÓSTICO E
GERENCIAMENTO DA SAÚDE E SISTEMA PRODUTO SERVIÇO
PARA O SUPORTE DE DECISÕES OPERACIONAIS**

EVANDRO LEONARDO SILVA TEIXEIRA

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR (APPROVED BY):

**Prof. Sadek Crisóstomo Absi Alfaro, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Benny Tjahjono, PhD (SAS-Cranfield University/UK)
(Examinador Externo)**

**Prof. Paulo Eigi Miyagi, Dr (EP-USP)
(Examinador Externo)**

**Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, PhD (ENM-UNB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Dr (ENM-UNB)
(Examinador Interno)**

BRASÍLIA/DF, 19 DE OUTUBRO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

TEIXEIRA, EVANDRO LEONARDO SILVA

Investigando a Interação entre Prognóstico e Gerenciamento da Saúde e Sistema-Produto Serviço para o Suporte de Decisões Operacionais. [Distrito Federal] 2012.

xvii, 157p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Sistemas Mecatrônicos, 2012).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Prognóstico e Gerenciamento da Saúde

2. Sistema-Produto Serviço

3. Simulação Online

4. Comportamentos Dinâmicos

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TEIXEIRA, E. L. S. (2012). Investigando a Interação entre Prognóstico e Gerenciamento da Saúde e Sistema-Produto Serviço para o Suporte de Decisões Operacionais, Publicação EMN.TD – 01A/12, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Evandro Leonardo Silva Teixeira.

TÍTULO: Investigando a Interação entre Prognóstico e Gerenciamento da Saúde e Sistema Produto Serviço no Suporte de Decisões Operacionais.

GRAU: Doutor ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Evandro Leonardo Silva Teixeira
SQS 402 Bloco B apt. 108, Asa Sul.
70.236-020 Brasília – DF – Brasil.

DEDICATORIA

*A Deus pela força, fé e perseverança para vencer todos os momentos difíceis
A meus pais Evando e Terezinha pelo apoio, carinho e educação exemplar
A minha irmã Viviane e a minha amada sobrinha Maria Isabel*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro parcial concebido, através de uma bolsa do programa REUNI, para a realização de meu curso de doutorado.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido para a realização de um estágio técnico no exterior na Universidade de Cranfield/Inglaterra.

Agradeço ao Grupo de Automação e Controle (GRACO) e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília pelos recursos físicos fornecidos (computadores, equipamentos, etc.).

Agradeço ao Departamento de Sistemas de Manufatura e ao Centro de Excelência IVHM da Universidade de Cranfield/UK pelos recursos fornecidos.

Um agradecimento especial ao meu orientador professor PhD Sadek Crisóstomo Absi Alfaro;

Um agradecimento também especial ao professor PhD Benny Tjahjono.

Agradeço também a todos os professores que formam o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

E a todos os amigos, colegas e pessoas que de alguma forma contribuíram para o alcance de mais esta vitória em minha vida.

EPÍGUAFRE

O maior dom da espécie humana consiste na capacidade de perseguir seus sonhos (AI – Inteligência Artificial).

RESUMO

Sistema-Produto Serviço (PSS) e Prognóstico e Gerenciamento de Saúde (PHM) têm sido até então investigados individualmente como temas de pesquisa não correlacionados. Entretanto, para garantir alta disponibilidade ou capacidade tipicamente requisitada em alguns modelos de negócio PSS, o fornecedor PSS deve ser capaz de reagir a circunstâncias não previstas durante a modelagem do PSS, a fim de evitar prejuízos, interrupções não programadas e possíveis penalidades contratuais. Uma das soluções viáveis para promover um melhor regime de manutenção, um ótimo gerenciamento da utilização e um maior controle sobre o custo do ciclo de vida dos ativos é utilizar um programa PHM para assistir à tomada de decisões em modelos de negócio PSS.

Utilizando os resultados de um programa PHM, o fornecedor PSS consegue maximizar o tempo de vida útil dos ativos. Desse modo, um melhor regime de manutenção, reparo e revisão pode ser empregado proporcionando também uma redução do risco de falha catastrófica. Um programa PHM também promove uma apropriada aquisição de peças de reparo e alocação da equipe de serviços. Estes benefícios são particularmente importantes para ativos de alto valor agregado (como motores de aeronaves, máquinas CNC de alta precisão, trens, turbinas de vento, etc.), já que requerem serviços auxiliares durante todo seus longos tempos de vida. Para este segmento de mercado, um pacote adicional de serviços auxiliares com suporte de um programa PHM pode promover uma fonte adicional de rendimentos para fornecedores PSS.

A ausência de métodos formais que promovam a interação PSS-PHM tem sido um dos grandes empecilhos para se explorar esta nova oportunidade de negócio. Os métodos existentes são soluções particulares ou exploram o potencial desta interação somente durante a fase de projeto do PSS. Por este motivo, esta tese investiga como um programa PHM pode assistir um modelo de negócio PSS em decisões operacionais. Esta tese também propõe um novo *framework* para a interação PSS-PHM. O *framework* desenvolvido foi implementado na forma de um ambiente de simulação computacional. Uma biblioteca de componentes e cinco protótipos foram desenvolvidos para a realização de experimentos. Os resultados dos experimentos demonstram a obtenção de indicadores de desempenho mais precisos em modelos de simulação online do que os obtidos em modelos de simulação tradicionais.

ABSTRACT

Product-Service System (PSS) and Prognostic Health Management (PHM) have so far been researched individually as unrelated research theme. However, to guaranty high availability or capability, which is typically demand in some PSS business models, the PSS provider must be able to react to unforeseen circumstances in order to avoid losses, unscheduled downtime and possibly contract penalties. A feasible solution to provide better maintenance, repair and overhaul regime, optimal asset usage and a greater lifecycle cost control is to employ a PHM program to assist decision making process in PSS business model.

Based on PHM program outcomes, the PSS provider can maximize the asset lifetime usage. As a consequence, better maintenance, repair and overall regime can be reached with additional catastrophic failure risk reduction. A PHM program results can also provide timely spare part acquisition and service team allocation. Those benefits are particular demand on high value assets (such as aero engines, high precision CNC machines, trains, wind turbine, etc.) which often requires auxiliary services during their whole long lifetime. In those cases, an additional bundle of services with PHM program support can promotes an additional source of revenue for PSS providers.

The lack of formal methods to promote PSS-PHM interaction has been seen as the greatest challenger to explore this new business opportunity. Furthermore, current methods are proprietary solutions or employed in PSS design phase alone. For this reason, this thesis investigates how to harness PSS and PHM interaction to support operational decisions. In addition, this thesis also proposes a novel framework for PSS-PHM interaction. The framework implementation provides a computer-based simulation environment where online simulation models can be designed. A library of simulation components and five prototypes were designed to carry out experiments. The simulation outcomes have shown more precise performance indication in online models against those obtained from traditional simulation methods

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| RESUMO | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| LISTA DE TABELAS | XIV |
| LISTA DE FIGURAS | XV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XVI |
| LISTA DE PUBLICAÇÕES | XVII |
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - OBJETIVO DA TESE | 2 |
| 1.2 - ESTRUTURA DO TEXTO | 4 |
| 2 - CONTEXTO INDUSTRIAL | 6 |
| 2.1 - CENÁRIO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA | 6 |
| 2.2 - NOVOS RUMOS PARA A INDÚSTRIA NO MERCADO MUNDIAL | 8 |
| 2.2.1 - Cenário atual da indústria mundial | 8 |
| 2.2.2 - Novas tendências e iniciativas da indústria | 12 |
| 2.3 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 13 |
| 3 - REVISÃO DA LITERATURA | 14 |
| 3.1 - CONCEITO DE SISTEMA-PRODUTO SERVIÇO | 14 |
| 3.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE PSS | 16 |
| 3.2.1 - PSS orientado ao produto | 16 |
| 3.2.2 - PSS orientado à disponibilidade | 16 |
| 3.2.3 - PSS orientado ao resultado | 17 |
| 3.3 - BENEFÍCIOS DO PSS | 18 |
| 3.4 - DESAFIOS PARA SE ADOPTAR O PSS | 19 |
| 3.5 - CONCEITO DE PROGNÓSTICO E GERENCIAMENTO DA SAÚDE | 20 |
| 3.6 - FUNÇÕES DE UM PROGRAMA PHM | 20 |
| 3.6.1 - Aquisição de dados | 21 |
| 3.6.2 - Processamento de dados | 21 |
| 3.6.3 - Diagnóstico de falhas | 22 |
| 3.6.4 - Prognóstico de falhas | 23 |
| 3.7 - BENEFÍCIOS DE UM PROGRAMA PHM | 24 |
| 3.8 - DESAFIOS PARA ESTABELECEER UM PROGRAMA PHM | 25 |
| 3.9 - CONCEITO DA INTERAÇÃO PSS-PHM | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 3.10 - EVIDÊNCIAS DA INTERAÇÃO PSS-PHM | 27 |
| 3.10.1 - Programa TotalCare | 28 |
| 3.10.2 - mt-iPSS | 29 |
| 3.10.3 - MATHS e LIKEMATH | 30 |
| 3.10.4 - Programa IVHM | 31 |
| 3.11 - IDENTIFICANDO A LITERATURA RELEVANTE | 32 |
| 3.12 - DESCRIÇÃO DOS FUNDAMENTOS | 35 |
| 3.12.1 - Típico cenário para se adotar uma solução PSS-PHM..... | 35 |
| 3.12.2 - Gerenciamento comportamentos dinâmicos em modelos PSS..... | 36 |
| 3.12.3 - Medidas de desempenho sobre a interação PSS-PHM..... | 37 |
| 3.12.4 - Alcançando de forma mais efetiva a interação PSS-PHM..... | 39 |
| 3.12.5 - Reavaliação das estratégias de negócio em modelos PSS..... | 41 |
| 3.13 - ANÁLISE DOS FUNDAMENTOS | 43 |
| 3.13.1 - Apoio à tomada de decisões no PSS utilizando um programa PHM | 43 |
| 3.13.2 - Capacidade das ferramentas e técnicas atuais de modelagem..... | 44 |
| 3.13.3 - Comparando modelos de negócio PSS com e sem a assistência PHM..... | 45 |
| 3.13.4 - Forças, fraquezas e oportunidades sobre a interação PSS-PHM | 46 |
| 3.14 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 47 |
| 4 - METODOLOGIA DE PESQUISA CIENTÍFICA..... | 48 |
| 4.1 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA..... | 48 |
| 4.1.1 - Etapa 1: Revisão da Literatura..... | 48 |
| 4.1.2 - Etapa 2: Modelo para a interação PSS-PHM..... | 49 |
| 4.1.3 - Etapa 3: Implementação do modelo | 50 |
| 4.1.4 - Etapa 4: Estudos de caso | 51 |
| 4.1.5 - Etapa 5: Análise dos resultados e conclusões..... | 52 |
| 4.2 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 53 |
| 5 - FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM | 54 |
| 5.1 - CONTEXTO TECNOLÓGICO DA INTERAÇÃO PSS-PHM..... | 54 |
| 5.2 - FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM..... | 56 |
| 5.2.1 - Módulo de prognóstico e gerenciamento da saúde | 57 |
| 5.2.2 - Módulo de estimação da confiabilidade..... | 58 |
| 5.2.3 - Módulo de simulação operacional | 59 |
| 5.2.4 - Módulo de análise e suporte a tomada de decisões..... | 61 |
| 5.3 - ANÁLISE DO FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM..... | 62 |

| | |
|--|------------|
| 5.4 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 63 |
| 6 - IMPLEMENTAÇÃO DO FRAMEWORK..... | 64 |
| 6.1 - VISÃO GERAL DE FUNCIONAMENTO DO FRAMEWORK..... | 64 |
| 6.2 - SELEÇÃO DA PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO..... | 65 |
| 6.2.1 - WITNESS | 66 |
| 6.2.2 - Anylogic | 67 |
| 6.2.3 - Arena | 68 |
| 6.2.4 - Flexsim | 69 |
| 6.2.5 - Plataforma de desenvolvimento escolhida | 70 |
| 6.3 - COMPONENTES DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDOS..... | 72 |
| 6.3.1 - Modelo padrão de ativo | 72 |
| 6.3.2 - Modelo personalizado de ativo | 74 |
| 6.3.3 - Modelo do sistema de aquisição de dados..... | 77 |
| 6.3.4 - Modelo do provedor de serviços..... | 78 |
| 6.3.5 - Controlador de simulação online | 80 |
| 6.4 - EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO ONLINE..... | 81 |
| 6.5 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 83 |
| 7 - ESTUDOS DE CASO..... | 84 |
| 7.1 - CASO 1: PROVA DO CONCEITO | 84 |
| 7.1.1 - Módulo de estimação da confiabilidade | 84 |
| 7.1.2 - Experimento..... | 85 |
| 7.1.3 - Análise dos resultados | 86 |
| 7.1.4 - Simulações..... | 88 |
| 7.1.5 - Experimentos | 90 |
| 7.1.6 - Análise dos resultados | 93 |
| 7.2 - CASO 2: DEMANDAS OPERACIONAIS | 94 |
| 7.2.1 - Simulação | 94 |
| 7.2.2 - Experimento..... | 95 |
| 7.2.3 - Análise dos resultados | 99 |
| 7.3 - CASO 3: ANALISE E SUPORTE A TOMADA DE DECISÕES..... | 100 |
| 7.3.1 - Descrição do estudo de caso | 100 |
| 7.3.2 - Simulações..... | 101 |
| 7.3.3 - Experimentos | 103 |
| 7.3.4 - Análise dos resultados | 104 |

| | |
|---|------------|
| 7.4 - CASO 4: SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO, REPARO E REVISÃO | 105 |
| 7.4.1 - Descrição do estudo de caso | 105 |
| 7.4.2 - Simulações | 106 |
| 7.4.3 - Experimentos | 107 |
| 7.4.4 - Análise de resultados | 108 |
| 7.5 - CASO 5: SERVIÇO DE GERENCIAMENTO DE FERRAMENTAS | 113 |
| 7.5.1 - Descrição do estudo de caso | 113 |
| 7.5.2 - Modelo da linha de fabricação | 114 |
| 7.5.3 - Modelo de linha auxiliar e de suporte a ferramentas | 116 |
| 7.5.4 - Experimentos | 118 |
| 7.5.5 - Análise dos resultados | 120 |
| 7.6 - SÍNTESE DO CAPÍTULO | 120 |
| 8 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 121 |
| 8.1 - CONCLUSÕES DA PESQUISA | 121 |
| 8.2 - CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA | 124 |
| 8.2.1 - Contribuições da metodologia de pesquisa | 124 |
| 8.2.2 - Contribuições técnicas | 124 |
| 8.2.3 - Contribuições para ferramentas | 125 |
| 8.3 - LIMITAÇÕES DA PESQUISA | 126 |
| 8.4 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 127 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 129 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 3.1: ARTIGOS MAIS RELEVANTES E SUAS RESPECTIVAS DESCRIÇÕES..... | 34 |
| TABELA 3.2: ANÁLISE SWOT SOBRE A INTERAÇÃO PSS-PHM..... | 46 |
| TABELA 6.1: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS PLATAFORMAS ANALISADAS..... | 70 |
| TABELA 7.1: PARÂMETROS DE ENTRADA – ESTUDO DE CASO 1..... | 86 |
| TABELA 7.2: RESULTADOS DO EXPERIMENTO - CONFIABILIDADE DO ATIVO..... | 87 |
| TABELA 7.4: RESULTADOS DO EXPERIMENTOS – ESTUDO DE CASO 1..... | 92 |
| TABELA 7.5: PARÂMETROS DE ENTRADA – ESTUDO DE CASO 2..... | 97 |
| TABELA 7.6: RESULTADOS DO EXPERIMENTO - ESTUDO DE CASO 2..... | 98 |
| TABELA 7.7: PARÂMETROS DE ENTRADA – ESTUDO DE CASO 3..... | 102 |
| TABELA 7.8: RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS – ESTUDO DE CASO 03..... | 104 |
| TABELA 7.9: PARÂMETROS DE ENTRADA (SIMULAÇÃO TRADICIONAL) – ESTUDO DE CASO 04. | 110 |
| TABELA 7.10: PARÂMETROS DE ENTRADA (SIMULAÇÃO ONLINE) – ESTUDO DE CASO 04..... | 111 |
| TABELA 7.11: RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS – ESTUDO DE CASO 04..... | 112 |
| TABELA 7.12: PARÂMETROS DE ENTRADA – ESTUDO DE CASO 05..... | 118 |
| TABELA 7.13: RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS – ESTUDO DE CASO 05..... | 119 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| FIGURA 2.1: ÍNDICE DE INOVAÇÃO GLOBAL (AMMIRATI <i>ET AL</i> , 2012)..... | 7 |
| FIGURA 2.2: GVA DA ECONOMIA AUSTRALIANA (FMIIC, 2011) | 10 |
| FIGURA 2.3: VALOR ECONÔMICO ADICIONADO (FORFÁS, 2006) | 11 |
| FIGURA 3.1: APLICAÇÃO DO CONCEITO PSS (ADAPTADO DE AZARENKO <i>ET AL</i> , 2009) | 15 |
| FIGURA 3.2: TIPOS DE PSS (ADAPTADO DE TUKKER & TISCHNER, 2006)..... | 17 |
| FIGURA 3.3: FUNÇÕES DE UM PROGRAMA PHM (VACHTSEVANOS <i>ET AL</i> , 2006) | 20 |
| FIGURA 3.5: MOTOR DE AERONAVE FORNECIDO PELA ROLLS-ROYCE (ROLLS-ROYCE, 2010)..... | 29 |
| FIGURA 3.6: SIMULAÇÃO ONLINE PARA PROMOVER A INTERAÇÃO PSS-PHM | 40 |
| FIGURA 4.1: ESPECIFICAÇÃO DA METODOLOGIA CIENTÍFICA ADOTADA..... | 48 |
| FIGURA 5.1: CONTEXTO DE INTEGRAÇÃO PSS-PHM..... | 55 |
| FIGURA 5.2: <i>FRAMEWORK</i> PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM (TEIXEIRA <i>ET AL</i> , 2012)..... | 57 |
| FIGURA 5.3: ESTIMAÇÃO DA CONFIABILIDADE (TEIXEIRA <i>ET AL</i> , 2012)..... | 60 |
| FIGURA 6.1: VISÃO GERAL DE FUNCIONAMENTO DO <i>FRAMEWORK</i> | 64 |
| FIGURA 6.2: MODELO PADRÃO DE ATIVO (SAM) | 73 |
| FIGURA 6.3: MODELO DE ATIVO PERSONALIZADO (CAM)..... | 74 |
| FIGURA 6.4: MODELO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 78 |
| FIGURA 6.5: MODELO DO PROVEDOR DE SERVIÇOS (SPM) | 79 |
| FIGURA 6.6: MODELO DO CONTROLADOR DE SIMULAÇÃO ONLINE | 81 |
| FIGURA 6.7: FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DE SIMULAÇÃO ONLINE | 82 |
| FIGURA 7.1: DADOS DE MONITORAMENTO CONDICIONAL PARA VALIDAÇÃO DO REM..... | 85 |
| FIGURA 7.2: CURVA DE DEGRADAÇÃO DO COMPONENTE CRÍTICO | 87 |
| FIGURA 7.3: SIMULAÇÃO APENAS COM SAMs – ESTUDO DE CASO 1 | 89 |
| FIGURA 7.4: SIMULAÇÃO APENAS COM CAMs – ESTUDO DE CASO 1 | 89 |
| FIGURA 7.5: DISPONIBILIDADE OPERACIONAL – SIMULAÇÃO APENAS COM SAMs | 91 |
| FIGURA 7.6: DISPONIBILIDADE OPERACIONAL - SIMULAÇÃO APENAS COM CAMs | 91 |
| FIGURA 7.7: SIMULAÇÃO ONLINE – ESTUDO DE CASO 2 | 95 |
| FIGURA 7.8: DISPONIBILIDADE OPERACIONAL – ESTUDO DE CASO 2..... | 96 |
| FIGURA 7.9: SIMULAÇÃO ONLINE – ESTUDO DE CASO 3 | 101 |
| FIGURA 7.10: SIMULAÇÃO ONLINE – ESTUDO DE CASO 4 | 109 |
| FIGURA 7.11: SIMULAÇÃO ONLINE DA LINHA DE FABRICAÇÃO..... | 115 |
| FIGURA 7.12: LÓGICA E VARIÁVEIS DA SIMULAÇÃO | 116 |
| FIGURA 7.13: MODELO DA LINHA AUXILIAR E DE SUPORTE A FERRAMENTAS | 117 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------|---|
| CAD | - Computer Aided Design |
| CBM | - Condition Based Maintenance |
| DES | - Discrete Event Simulation |
| DLL | - Dynamic Link Library |
| FFT | - Fast Fourier Transform |
| GDB | - Gross Domestic Product |
| ICT | - Information and Communication Technology |
| IVHM | - Integrated Vehicle Health Management |
| KPI | - Key Performance Indicator |
| LRU | - Line Replaceable Unit |
| METL | - Mean Expected Tool Life |
| MRO | - Maintenance Repair and Overhaul |
| MTBF | - Mean Time Between Failures |
| MTBS | - Mean Time Between Setup |
| MTTC | - Mean Time to Tool Change |
| MTTR | - Mean Time To Repair |
| MTTS | - Mean Time To Setup |
| OEM | - Original Equipment Manufacturer |
| OSE | - Online Simulation Engine |
| PHM | - Prognostics and Health Management |
| PLB | - Performance Based Logistics |
| PSS | - Product-Service System |
| REM | - Reliability Estimation Module |
| ROI | - Return Of Investment |
| RUL | - Remaining Useful Life |
| STFT | - Short-Time Fourier Transform |
| SWOT | - Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats |
| UML | - Unified Modelling Language |

LISTA DE PUBLICAÇÕES

- Teixeira, E. L. S., Tjahjono, B., Alfaro, S. C. A. & Juliao, J. M. S. (2013). Harnessing Prognostics Health Management and Product-Service Systems interaction to Support Operational Decisions. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 24 (1) p. xx-xx.
- Teixeira, E. L. S., Tjahjono, B. & Alfaro, S. C. A. (2012). A Novel Framework to Link Prognostics and Health Management and Product-Service System using Online Simulation. *Computers in Industry*. 63 p. 669-679.
- Tjahjono, B., Teixeira, E. L. S., Corbett, J. & Alfaro, S. C. A. (2012). An Online Simulation to Link Asset Condition Monitoring and Operations Decisions in Through-life Engineering Services. – sendo preparado.
- Teixeira, E. L. S., Tjahjono, B. & Alfaro, S. C. A. (2012). An Online Simulation Tool for Availability Contracts – sendo preparado.

1 - INTRODUÇÃO

As empresas estão investindo em novos modelos de negócio para se tornarem mais competitivas frente ao mercado globalizado. Isto se deve principalmente ao aumento dos desafios em operações globais que devem, cada vez mais, incluir desenvolvimento sustentável, regulação ambiental e inovação. Em particular, a inovação somente baseada no incremento funcional e na redução de custos tem se mostrado insuficiente diante de economias consideradas de baixo custo (como é o caso da China). Sob este novo contexto, os modelos de negócio baseados na oferta de produtos e serviços (PSS) vêm se destacando como forma estratégica de manter a competitividade das empresas (Zhu *et al*, 2012). Nesta nova modalidade de negócio, derivada do conceito de servitização¹, o fornecedor deixa de oferecer somente a venda de produtos e passa a oferecer a venda integrada de produtos e serviços.

Ao oferecer a venda integrada de produtos e serviços o fornecedor, que pode ser o *Original Equipment Manufacturer* (OEM), assume responsabilidade parcial ou total sobre o desempenho dos ativos. Desse modo, atividades secundárias (como manutenção, reparo, aquisição de peças para reparo, etc.) que não fazem parte diretamente do *core* do negócio são absorvidas pelo fornecedor e oferecidas ao cliente na forma de pacotes de serviços. Isto pode se tornar uma vantagem competitiva para ambas as partes envolvidas no negócio, já que pode aumentar os ganhos nas vendas do fornecedor, assim como reduzir riscos e diminuir custos de manutenção e suporte para o cliente (Neely, 2008). De fato, a transferência de responsabilidades, em geral, promove a co-criação de valores de tal forma que tanto o cliente quanto o fornecedor podem se beneficiar.

Ao oferecer produtos e serviços integrados, o fornecedor assume maior responsabilidade sobre o funcionamento do ativo. Esta responsabilidade é firmada por meio de índices de desempenho estabelecidos em contratos de serviço. Caso o fornecedor não atenda aos requisitos firmados, penalidades contratuais podem ser aplicadas. O fornecedor então se torna responsável por gerenciar o tempo de vida dos ativos, peças para reparo e serviços de manutenção tendo como meta maximizar o desempenho dos ativos e reduzir os custos operacionais por eles produzidos

¹Servitização é um processo de criação de valor em que funções de serviços são adicionadas a novos produtos ou já existentes (Baines *et al*, 2009a).

(Spring & Araujo, 2009) (Williams, 2007). Neste contexto, o emprego de um programa PHM promove um melhor gerenciamento do tempo de vida dos ativos propiciando uma execução mais adequada das atividades de manutenção para evitar falhas catastróficas ou não esperadas (Khalak & Tierno, 2006).

Um programa PHM fornece informações sobre o estado de saúde de um ativo. Utilizando estas informações é possível programar, antecipadamente, as intervenções de cunho logístico e operacional. Em outras palavras, atividades auxiliares (como manutenção, reparo, aquisição de peças para reparo, dentre outras) serão executadas somente quando estritamente necessárias. Por este motivo, funções de prognóstico e diagnóstico de falhas (comumente encontradas em um programa PHM) são tipicamente empregadas em ativos de alto valor agregado proporcionando novas oportunidades de negócio (Neely, 2007). Utilizando um programa PHM, as empresas podem capturar variações de desempenho durante todo o ciclo de vida dos ativos. Isto é particularmente útil para setores *high-tech* (como aeroespacial, militar, etc.) em que os custos operacionais podem se tornar uma fonte significativa de geração de rendimentos para um fornecedor em um modelo de negócio PSS.

Contudo, esta tese se propõe a investigar a interação entre Prognóstico e Gerenciamento de Saúde e Sistema-Produto Serviço para o suporte de decisões operacionais. Para contribuir de forma efetiva com esta interação, esta tese propõe um novo *framework* para desenvolver simulações online. Utilizando o *framework* e os componentes de simulação desenvolvidos, fornecedor PSS pode então desenvolver simulações que sejam periodicamente atualizados com dados reais dos ativos. Com base nos resultados obtidos com a execução das simulações, tomadas de decisões associadas as atividades auxiliares podem então ser mais precisamente realizadas.

1.1 - OBJETIVO DA TESE

Este trabalho tem como principal objetivo:

“Investigar a interação entre Prognóstico e Gerenciamento da Saúde e Sistema-Produto Serviço para o Suporte de Decisões Operacionais”

A pesquisa conduzida ao longo deste trabalho está direcionada a compreender a relação entre um modelo de negócio PSS e um programa PHM para o suporte de decisões operacionais. Em outras palavras, o escopo da investigação está voltado para a fase operacional do PSS, isto é, quando o modelo de negócio estabelecido entre as partes passa a ser efetivamente executado. Isto significa que a solução proposta considera que o modelo de negócio PSS já foi estabelecido e que mudanças serão realizadas somente para atender aos índices de desempenhos, demandas operacionais e para reagir a circunstâncias não previstas durante o projeto do PSS. Para compreender melhor o assunto que será investigado, algumas indagações sobre o tema de pesquisa podem ser formuladas:

- 1) Qual o cenário típico para se adotar uma solução PSS-PHM?
- 2) Como tratar comportamentos dinâmicos em um modelo de negócio PSS?
- 3) Quais são os índices de desempenho sobre a interação PSS-PHM?
- 4) Como alcançar uma efetiva interação PSS -PHM?
- 5) Quais são os benefícios de negócios oriundos da interação PSS-PHM?

Com base no objetivo e nas perguntas formuladas, um procedimento sistemático de revisão da literatura é estabelecido para identificar a literatura mais relevante. Diversas bases de dados (como o ScholarGoogle, SCIRUS, Emerald, etc.) foram consultadas utilizando um conjunto de palavras-chave relevantes e suas respectivas combinações para um período de 12 anos (de 2000 a 2012). Dos 136 trabalhos identificados, apenas 14 tratam mais estritamente da interação PSS-PHM (tabela 3.1). Com base na revisão da literatura e na leitura dos trabalhos mais relevantes, as perguntas anteriormente formuladas são previamente respondidas na forma de fundamentos (item 3.12 do capítulo 03).

A descrição dos fundamentos (item 3.12 do capítulo 03) fornece uma resposta preliminar para as perguntas anteriormente realizadas. Entretanto, ainda que os fundamentos obtidos ajudem a compreender melhor o tema de pesquisa proposto, eles não apresentam uma solução definitiva para todas as questões levantadas. Por este motivo, a análise dos fundamentos apresentada no item 3.13 (capítulo 03) avalia o estado da arte sobre a interação PSS-PHM e identifica importantes contribuições que ainda necessitam ser realizadas. A análise das forças, fraquezas e oportunidades (item 3.13.4) especifica categoricamente uma futura agenda de pesquisa.

1.2 - ESTRUTURA DO TEXTO

Este texto foi estrategicamente organizado e estruturado em oito capítulos. Uma descrição de cada capítulo e do seu respectivo objetivo é apresentado nos itens abaixo como forma de explicar ao leitor, de forma sucinta, o conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 02: O capítulo 02 apresenta o contexto industrial em que este trabalho está inserido. Inicialmente é descrito o cenário da indústria nacional e a importância do processo de inovação para promover o crescimento da indústria brasileira. Posteriormente são especificados os novos rumos para a indústria no mercado mundial, assim como as principais tendências e iniciativas das indústrias para se manterem competitivas no mercado.

Capítulo 03: O capítulo 03 trata da revisão da literatura sobre o tema de pesquisa proposto. Por se tratar de um tema de pesquisa multidisciplinar, inicialmente é descrito o conceito PSS com seus benefícios e desafios, posteriormente o conceito PHM também com seus benefícios e desafios e por último o conceito da interação PSS-PHM, evidências da interação PSS-PHM, a literatura relevante sobre o tema de pesquisa, uma descrição e uma análise do fundamentos.

Capítulo 04: O capítulo 04 descreve a metodologia científica adotada por este trabalho. Inicialmente é apresentada uma visão geral da metodologia, bem como as etapas e a seqüência em que elas devem ser realizadas. Posteriormente cada etapa individualmente é comentada como forma de orientar o desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 05: No capítulo 05 é descrito um novo *framework* para promover interação PSS-PHM. O modelo de interação, proposto da forma de um *framework*, é composto por quatro módulos devidamente conectados. Uma explicação detalhada de cada módulo, assim como a interação entre eles é posteriormente apresentada. Por último, uma análise detalhada do *framework* proposto é apresentada como forma de discutir o potencial benefício de utilização do mesmo.

Capítulo 06: Este capítulo apresenta os detalhes de implementação do *framework* proposto. Quatro plataformas comerciais foram analisadas, sendo apenas uma selecionada para a implementação do *framework*. Componentes para a construção de simulações online foram desenvolvidos. A última seção descreve a execução de uma simulação online desenvolvida com base no *framework*.

Capítulo 07: No capítulo 07 relata os estudos de caso e as respectivas simulações desenvolvidas com base no *framework* proposto. No primeiro estudo de caso se realiza a prova do conceito, isto é, a validação do *framework*. Nos estudos de caso 02 e 03 foi verificada a capacidade das simulações em reagir a demandas operacionais e a melhoria promovida por um programa PHM respectivamente. Os dois últimos estudos de caso são dedicados a validação do *framework* com dados reais obtidos de indústrias.

Capítulo 08: O último capítulo apresenta as conclusões, as contribuições, as limitações e as sugestões de trabalho futuros sobre o tema de pesquisa. As contribuições foram classificadas em metodologia, técnicas e de ferramenta. Posteriormente são descritas as limitações da pesquisa. O capítulo então é finalizado com sugestões para trabalhos futuros.

2 - CONTEXTO INDUSTRIAL

Este capítulo descreve os principais desafios enfrentados pela indústria para promover crescimento e competitividade através do processo de inovação. Inicialmente é apresentado o cenário da indústria nacional e as ações que o governo brasileiro tem adotado para promover a inovação. Posteriormente são apresentados o cenário da indústria mundial, os mecanismos e as principais iniciativas para promover soluções inovadoras e vantagens competitivas. Um enfoque especial é dado aos elementos da tecnologia de comunicação e informação (ICT) como forma de promover soluções inovadoras e novas oportunidades de negócio.

2.1 - CENÁRIO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Países com experiência de desenvolvimento bem sucedida têm demonstrado que somente através de uma forte base industrial é possível contribuir, de forma efetiva, para o crescimento econômico de forma sustentável (DECOMTEC, 2006). De fato, manter a indústria competitiva é uma importante forma de promover o crescimento econômico e a prosperidade de uma nação em longo prazo (Deloitte, 2012). Em geral, o desenvolvimento industrial de um país leva a um crescimento do produto interno bruto (PIB), a uma maior geração do número de vagas no mercado de trabalho e ao aumento da competitividade frente ao mercado mundial. Dentre os pilares que sustentam o crescimento industrial de uma nação de forma contínua e sustentável está a inovação (INSEAD, 2012).

O processo de inovação constitui um dos mais importantes componentes da política industrial de uma nação. Isto porque, a medida que as empresas inovam, elas passam a contribuir de forma mais efetiva para o desenvolvimento econômico (Prochnik & Araújo, 2005). Em geral, as empresas que inovam tendem a ofertar mais empregos em relação as que não inovam independentemente do tamanho, da atividade e de demais fatores (Mastrostefano & Pianta, 2004). Somente através do processo de inovação é possível atender a demandas de um mercado consumidor cada vez mais exigente, e, ao mesmo tempo, resistir às pressões decorrentes da competitividade imposta pelo mercado internacional (Junior *et al*, 2004)

No Brasil esta realidade não é diferente. O governo brasileiro tem buscado o desenvolvimento industrial através de políticas públicas com foco e incentivo a inovação. Isto porque, embora a indústria brasileira seja bastante diversificada quando comparada à de muitos países desenvolvidos, suas exportações ainda são baseadas em *commodities* primárias e bens industrializados de baixo cunho tecnológico e pouco valor agregado (Sarleno, 2004). Dados da Pesquisa de Inovação Tecnológica (PINTEC) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com o apoio da FINEP e do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) revelam que, embora o número de empresas brasileiras inovadoras tenha passado de 32.800 (em 2005) para 41.300 (em 2008) (um aumento percentual de 38,6%), a taxa de inovação do país está muito baixa em relação aos principais competidores internacionais (PINTEC, 2010). Esta mesma informação pode ser extraída do relatório *The Global Innovation Index 2011* em que o Brasil ocupa a 47ª posição no *ranking* mundial de inovação (INSEAD, 2012). A figura 2.1 ilustra o índice de inovação global de alguns países (incluindo o Brasil).

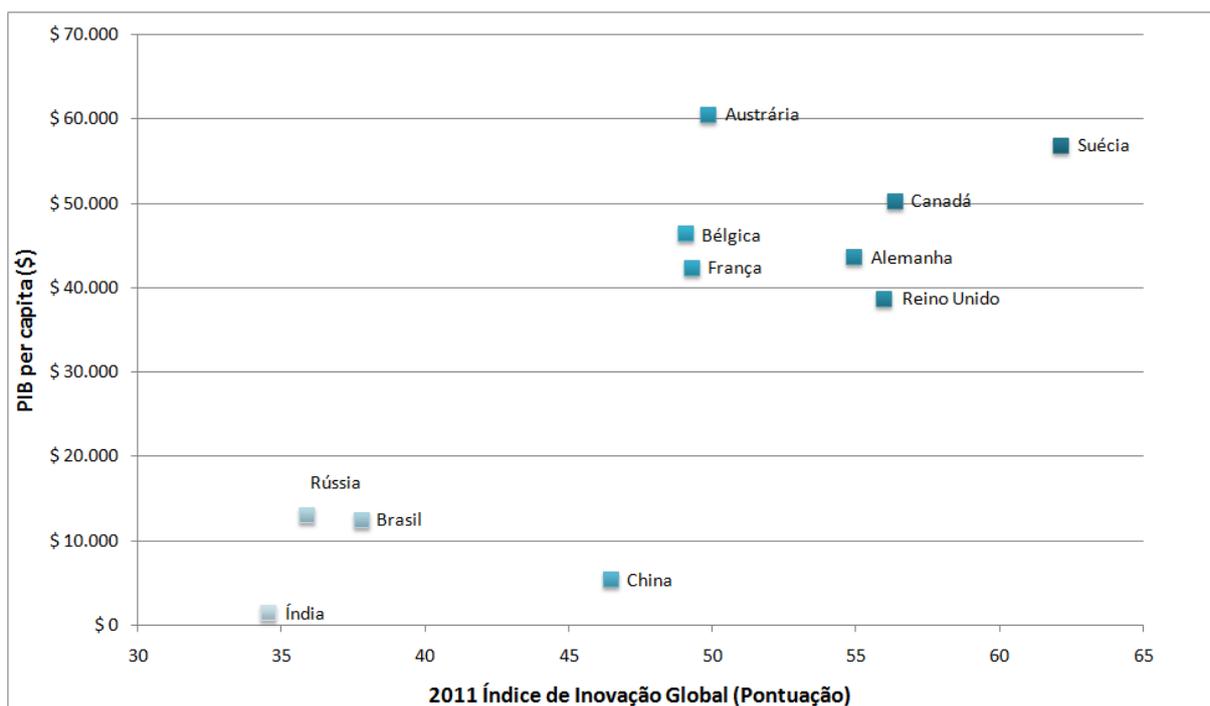


Figura 2.1: Índice de inovação global (Ammirati *et al*, 2012)

Com base nos resultados apresentados é possível verificar uma relação direta entre a posição do *ranking* e o PIB per capita. Em outras palavras, países que possuem os melhores índices de inovação global (como Suécia, Canadá, Reino Unido, etc.) são os mesmos que apresentam os maiores PIB per capita. Isto reforça a premissa de que o processo de inovação é fundamental para gerar crescimento industrial, como também do PIB de uma economia. Embora o Brasil

possua o segundo maior PIB per capita entre os emergentes, seu índice de inovação global ainda continua abaixo dos de muitos outros países (como o da China, da Austrália, etc).

Por este motivo, as políticas industriais brasileiras têm buscado promover um crescimento industrial sólido, em longo prazo, com base no processo de inovação. Por exemplo, em um balanço divulgado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia em 2008, dentre as medidas e ações sistemáticas a serem tomadas para estimular a inovação está o lançamento de novas linhas de crédito através do BNDES para fornecer um montante de R\$ 6 bilhões de reais (em dois anos) para apoiar os esforços de inovação das empresas (Linha Capital Inovador), como também projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (Linha Inovação Tecnológica) (PDP, 2012). O governo brasileiro está, de fato, convencido de que o apoio a inovação é primordial para assegurar a competitividade e o crescimento econômico sustentável do país. Mais ainda, o governo brasileiro já admite que somente elevando a capacidade de inovação seja possível agregar valor aos produtos nacionais, ampliar a competitividade das empresas no mercado doméstico e fortalecer a inserção externa do país (PDP, 2012).

2.2 - NOVOS RUMOS PARA A INDÚSTRIA NO MERCADO MUNDIAL

2.2.1 - Cenário atual da indústria mundial

O mercado internacional está diante de uma nova realidade que rege a relação entre produção e consumo. O aumento da competitividade e da concorrência tem provocado mudanças estruturais e contínuas nas relações de negócio e na indústria. Em particular, a economia dos países desenvolvidos tem sofrido uma forte influência das chamadas “nações emergente” (como China, Índia, Rússia, Brasil, etc.) que vêm ganhando mais destaque e importância no cenário internacional. Produtos considerados de alto valor agregado (como computadores, notebooks, televisores, celulares, etc.) estão se tornando cada vez mais similares e parecidos, o que tem reduzido a margem de lucro dos fabricantes e a percepção de valor agregado por parte dos clientes. Sob este novo contexto, a indústria tem buscado novas alternativas para desenvolver produtos e soluções diferenciadas, a fim de se tornar mais competitiva, atrair mais a atenção de investidores e de seus clientes e aumentar ainda mais suas margens de lucro.

O processo de inovação reconhecidamente essencial para o desenvolvimento econômico e sustentável (OECD, 2012) tem sofrido mudanças ao longo dos últimos anos. Devido ao fenômeno da comoditização de produtos², a inovação centrada somente na evolução tecnológica e incremental não tem sido suficiente para promover os níveis de competitividade e de crescimento industrial almejado. Por este motivo, as empresas têm buscado novos métodos e procedimentos para adicionar maior valor em seus modelos de negócio, tornando-se mais diferenciais e atrativas a seus clientes. Uma das soluções promissoras para alcançar os níveis de competitividade e de sustentabilidade desejados consiste em deixar de oferecer somente a venda de produtos e passar a oferecer a venda integrada de produtos e serviços (Tukker & Tischner, 2006). Desenvolver soluções integradas que combinam produtos e serviços tem se mostrado vantajoso, em particular, para as empresas que enfrentam a comoditização de seus produtos e apostam em serviços como uma solução promissora para diferenciar ofertas, satisfazer seus clientes e melhorar os seus desempenhos financeiros (Oliva & Kallenberg, 2003).

O setor de serviços já desempenha um importante papel nas economias desenvolvidas (Tamura *et al*, 2005). Em uma pesquisa realizada pelo *Future Manufacturing Industry Innovation Council* (FMIIC, 2011) verificou-se que o valor acrescentado bruto³ (GVA) relacionado com a atividade industrial australiana tem caído ao longo dos últimos anos e aumentado para as atividades de serviço. Em 25 anos (junho de 1986 a junho de 2011) foi observado que o GVA das atividades industriais caiu de 16% para 10%. Neste mesmo período, o GVA das atividades de serviços aumentou de 6% para 16%, sendo que este valor ainda continua a crescer. Comportamento similar também é observado ao se comparar o nível de emprego por atividade econômica. Por este motivo, o setor de serviços está se tornando um importante componente no crescimento econômico dos países. A figura 2.2 ilustra o GVA da economia australiana para o período de levantamento dos dados.

² Comoditização está relacionada com a dificuldade cada vez maior que um produto tem para se diferenciar de outro tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista funcional (Kahtalian, 2002)

³ O valor acrescentado bruto (GVA) especifica o resultado final de uma atividade menos o valor do consumo intermediário, em outras palavras, uma medida da contribuição individual de um setor para compor o PIB (OECD, 2012a).

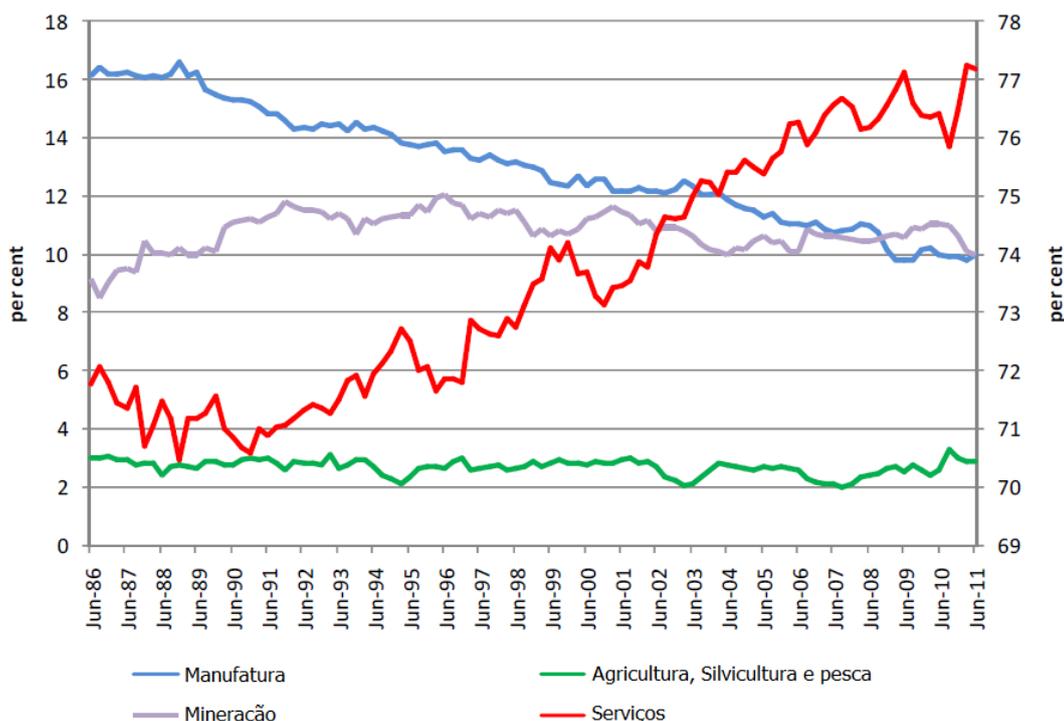


Figura 2.2: GVA da economia australiana (FMIIC, 2011)

Em uma outra pesquisa realizada pelo *Irish National Policy and Advisory Board For Enterprise, Trade, Science, Technology and Innovation* (Forfás, 2006) também foi observado um crescimento do setor de serviços em detrimento ao setor industrial na economia irlandesa. A análise realizada considerou os dados das atividades econômicas dos países que compõem o OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*)⁴. Entre 1988 e 2003 houve um aumento de 7,1% no valor econômico adicionado (de 60,5% para 67,6%) para as atividades de serviço, enquanto que uma redução do valor econômico adicionado de 4,9% (de 33,8 para 28,9%) para as atividades industriais. Estes resultados reforçam a premissa de que o setor de serviços tem contribuído cada vez mais para o crescimento econômico dos países que compõem o grupo OECD. A figura 2.3 ilustra a contribuição das atividades de serviço e industrial para o valor econômico adicionado.

⁴ Lista dos países que compõem a OECD: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, República Checa, Dinamarca, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Coréia, Luxemburgo, México, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, República da Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

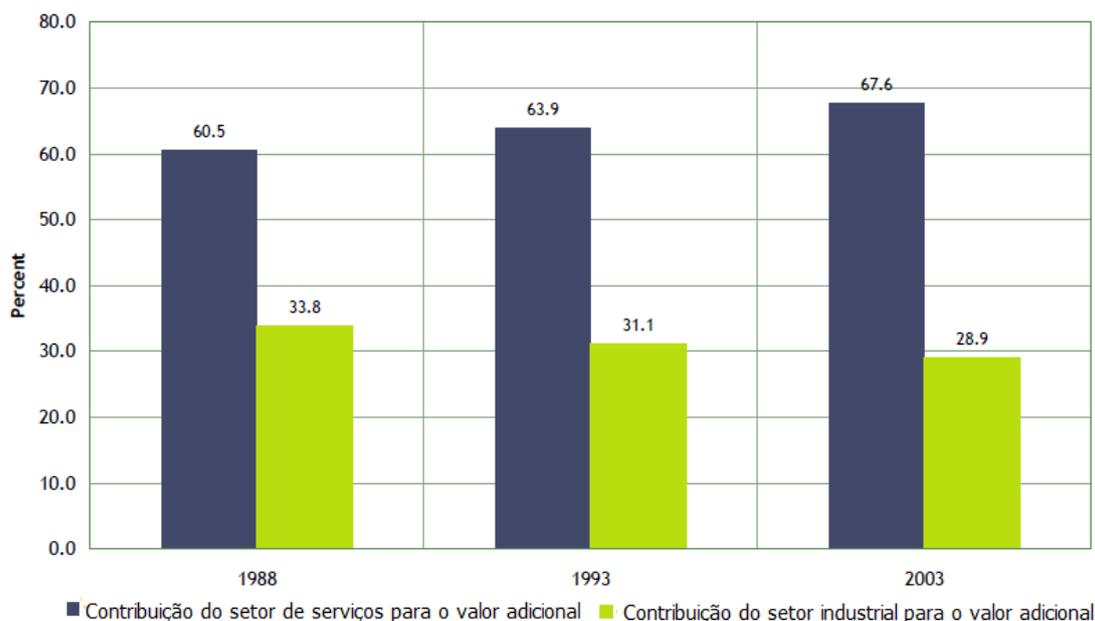


Figura 2.3: Valor econômico adicionado (Forfäs, 2006)

Esta tendência do crescimento do setor de serviços em detrimento das atividades industriais também está presente no relatório elaborado pelo *World Economic Forum* (Ammirati *et al*, 2012). De acordo com o relatório, ao longo dos últimos 30 anos o valor global adicionado associado com a atividade industrial tem sido reduzido de 35% (em 1985) para 27% (em 2008). Entretanto, observou-se que durante este mesmo período, o setor de serviços tem aumentado seu valor global adicionado de 59% (em 1985) para 70% (em 2008) sendo que este valor ainda continua a crescer. Isto demonstra a importância do setor de serviços para o crescimento da economia, e ao mesmo tempo, reforça a premissa de que a indústria necessita buscar novas alternativas para se manter competitiva.

Os resultados apresentados demonstram que o setor de serviços está em forte expansão e também contribuindo, cada vez mais, para o crescimento econômico e para a criação de novos empregos. Esta realidade tem provocado o setor industrial no intuito de repensar suas metas e seus conceitos para promover novas oportunidades de negócio. As empresas de manufatura estão se convencendo que para expandirem seus negócios é preciso investir mais em modelos de negócios que promovam a provisão de produtos e serviços integrados. Investir mais em inovação em serviços pode impactar na interação entre fornecedor e cliente promovendo uma maior troca de experiência para instalar, obter, realizar manutenções, atualizar e descartar produtos (IFM & IBM, 2008).

2.2.2 - Novas tendências e iniciativas da indústria

Diante dos resultados apresentados, a indústria está reconhecendo que para se manter competitiva no mercado é preciso promover soluções inovadoras que combinam produtos e serviços. Líderes da indústria mundial (como a HP, Apple, Rolls-Royce, TomTom e a GE) já reconhecem que somente a inovação de produtos não produz mais as vantagens competitivas necessárias (Shelton, 2009). De fato, as empresas que oferecem produtos e serviços tendem a obter mais sucesso, a partir de um modelo de negócio mais sustentável em relação àquelas que não oferecem (DTI, 2007). As empresas que mais expandiram seus negócios nos últimos anos são aquelas que ofereceram assistência técnica, troca de experiência e em alguns casos informações proprietárias como parte da solução a seus clientes (Sheehan, 2006).

Ao oferecer um pacote de serviços ao cliente, o fornecedor incorpora na solução atividades de suporte ao produto. As atividades de suporte podem incluir instalação, treinamento, consultoria, serviços de manutenção e reparo, disponibilidade de peças para reparo, dentre outras (Goffin, 2001). Dependendo das atividades ofertadas, o fornecedor passa a ter responsabilidade direta sobre o desempenho dos ativos sendo, em alguns casos, esta responsabilidade estendida por todo ciclo de vida do ativo. Para o fornecedor, a oferta de soluções baseadas em serviços tem como principal vantagem promover uma maior capacidade de inovação a partir da melhoria contínua de projetos e da oferta de soluções particulares (Mont, 2002). De fato, a inovação de projeto promovida pela maior interação entre fornecedor e cliente proporciona uma personalização mais facilitada e, em geral, mais alinhada com a real necessidade de cada cliente (Geyer *et al*, 2003).

Soluções que combinam a oferta de produtos e serviços são, tipicamente, mais difíceis de serem copiadas (Mont, 2002). Isto porque elas são projetadas considerando o contexto e a necessidade particular de cada cliente. Soluções baseadas na oferta de produtos e serviços promovem maior percepção de valor agregado por parte do cliente, o que leva os fornecedores a obterem maiores rendimentos, a perceberem maiores oportunidades de negócio e a promover a fidelização de seus clientes (Tukker, 2004). Ao oferecer soluções integradas de produtos e serviços, em geral, o fornecedor utiliza de seu conhecimento técnico para maximizar o desempenho do ativo produzindo maiores rendimentos e satisfação aos seus clientes.

Outra tendência dos modelos de negócio baseados na oferta de produtos e serviços consiste na utilização da tecnologia da informação e comunicação (ICT) para promover novas oportunidades de negócio. A aplicação desta tecnologia tem se tornado fundamental para que o OEM (*Original Equipment Manufacturer*) assuma total responsabilidade sobre o desempenho, a disponibilidade e a confiabilidade do ativo (Lightfoot *et al*, 2011). Nesta situação, elementos da ICT alocados em um programa PHM são empregados para monitorar o desempenho dos ativos. Em geral, esta prática leva a uma redução dos riscos, a compreender melhor os mecanismos e as conseqüências das falhas e a outros benefícios indiretamente associados (Grubic *et al*, 2009).

Programas PHM estão sendo mais empregados em modelos de negócio que combinam produtos e serviços. Em uma recente pesquisa realizada por Grubic *et al* (2011) no Reino Unido, verificou-se que funções de diagnóstico e prognóstico (comumente encontradas em um programa PHM) estão sendo aplicadas em diversos setores da indústria como: aeroespacial (15%), defesa (14%), marinha (12 %), eletrônica (10 %), potência (9%), óleo e gás (7%) e energia (6%). Com base nesta mesma pesquisa, observou-se também que esta tendência continua a aumentar e tem como principal motivador melhorar o desempenho dos ativos, promover uma transferência de risco para o fornecedor de forma mais segura e gerar novas oportunidades de negócio.

2.3 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreve os principais desafios enfrentados pela indústria para promover crescimento e competitividade através do processo de inovação. Inicialmente é apresentado o cenário da indústria nacional e as ações que o governo brasileiro tem adotado para promover a inovação. Posteriormente é apresentado o cenário da indústria mundial, as tendências e as principais iniciativas para gerar um crescimento industrial em longo prazo e de forma sustentável. Soluções que combinam a oferta integrada de produtos e serviços estão dentre as iniciativas inovadoras que mais se destacam. Quando a oferta de soluções inovadoras leva o OEM a assumir responsabilidade direta sobre o desempenho do ativo, elementos da ICT têm sido utilizados para promover uma transferência de risco mais segura. O próximo capítulo apresenta uma revisão do estado da arte sobre o tema de pesquisa proposto.

3 - REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresentada os principais conceitos, questões e definições relacionadas ao tema de pesquisa. Por se tratar de um projeto de pesquisa multidisciplinar, os tópicos deste capítulo foram inicialmente selecionados e organizados de acordo com cada área de conhecimento. Já o último tópico descreve especificamente a interação PSS-PHM, indícios da ocorrência desta interação e os principais desafios para que ela possa ser, de fato, realizada.

3.1 - CONCEITO DE SISTEMA-PRODUTO SERVIÇO

O Sistema-Produto Serviço (PSS) surgiu como uma nova estratégia competitiva para explorar novos mercados, em que as empresas mudam seus tradicionais modelos de negócio (baseado somente na venda de produtos) para a venda integrada de produtos e serviços (Tan *et al*, 2009) (Mont, 2002). Em um modelo de negócio PSS, considerado um caso particular de servitização, a produtização⁵ de serviços e a servitização de produtos se fundem para se tornar uma única oferta de produtos e serviços (Baines *et al*, 2007). Tipicamente, neste novo modelo de negócio os consumidores não adquirem os ativos, mas a disponibilidade ou a capacidade de utilizar o ativo por um período contratual pré-fixado (Cook *et al*, 2006).

Em um modelo de negócio PSS, o OEM não oferece o direito de propriedade sob um ativo ao cliente, mas uma solução integrada que combina a provisão de produtos e serviços. Desse modo, o OEM absorve atividades complementares (como instalação, treinamento, manutenção, suporte, dentre outras.) que não estejam diretamente relacionadas com a utilização do ativo e as oferece ao cliente na forma de serviços. Isto é particularmente importante ao cliente, já que permite que o mesmo se dedique exclusivamente ao *core* de seu negócio. Embora esta oferta de serviços implique também em transferência de responsabilidades, o OEM se beneficia diretamente ao criar uma relação mais sólida de fornecimento e consumo, o que normalmente leva a fidelização de seu cliente. A figura 3.1 ilustra um exemplo clássico de aplicação do modelo de negócio PSS na indústria de máquina-ferramenta.

⁵ A produtização consiste na evolução de componentes de serviços para incluir um produto ou até mesmo um novo componente de serviço comercializado como um produto (Baines *et al*, 2007)

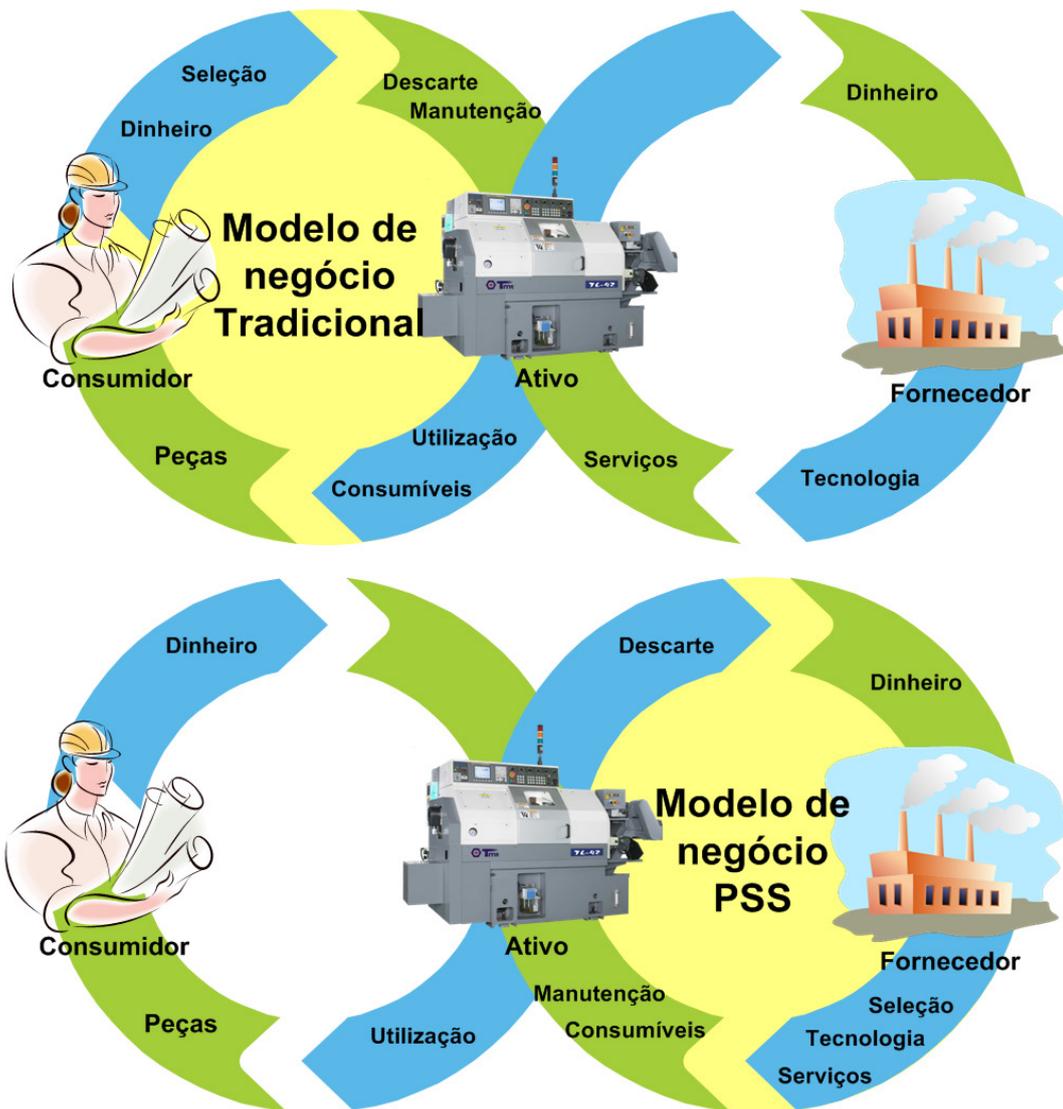


Figura 3.1: Aplicação do conceito PSS (adaptado de Azarenko *et al*, 2009)

No modelo tradicional de negócio (figura 3.1), o fornecedor realizava somente a venda do ativo para o cliente. Após a venda, sua responsabilidade sobre o ativo é estendida somente para serviços de pós-venda (como suporte a utilização e extensão de garantia). Desse modo, atividades complementares como instalação, treinamento, aquisição de material de suprimento, manutenção, dentre outras, devem ser gerenciadas e promovidas pelo cliente. Por outro lado, no em um modelo de negócio PSS (figura 3.1), a responsabilidade do fornecedor é estendida durante todo o ciclo de vida do ativo. Com isso, as atividades auxiliares (como manutenção, reparo, otimização, instalação, dentre outras) são transferidas para o fornecedor que as incorpora no pacote de venda do ativo para então serem vendidas como solução para o cliente. De fato, em um modelo de negócio PSS o fornecedor não recebe pela transferência de propriedade do ativo, mas pela disponibilidade ou pelos resultados alcançados com a utilização do mesmo (Morelli, 2006).

3.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE PSS

Embora não exista formalmente uma classificação sistemática dos diferentes tipos de PSS, a maior parte das referências consultadas classifica os diferentes tipos de PSS tendo como base o grau de responsabilidade que é transferido do cliente para o fornecedor. Desse modo, os diferentes tipos de PSS podem ser classificados em (Baines *et al*, 2007)(Tukker & Tischner, 2006):

- PSS orientado ao produto;
- PSS orientado à utilização;
- PSS orientado ao resultado;

3.2.1 - PSS orientado ao produto

Este é o típico caso de PSS em que o cliente adquire um ativo do fornecedor no modo tradicional de negócio e um pacote de serviços integrados. Desse modo, o direito de propriedade continua a ser transferido para o cliente, o que limita a responsabilidade do OEM sobre o ativo. O pacote de serviços pode incluir, por exemplo, a extensão de garantia, o suprimento de consumíveis, contratos de manutenção, o fornecimento de peças para reparo, treinamentos, consultorias, dentre outros. Neste modelo de negócio, o cliente é incentivado a adquirir o pacote de serviços para auxiliá-lo a obter máxima eficiência do ativo e uma boa relação custo-benefício.

3.2.2 - PSS orientado à disponibilidade

No PSS orientado à disponibilidade, o cliente adquire somente o direito de utilizar o ativo. Este é o típico caso de arrendamento mercantil (também conhecido como *leasing*). O OEM e o cliente, também denominados de arrendador e arrendatário, estabelecem uma relação de arrendamento firmada através de um contrato, com regras bem definidas que devem ser cumpridas entre as partes. Neste modelo de negócio, o OEM não só mantém o direito de propriedade sobre os ativos, como também garante a disponibilidade estabelecida no contrato firmado. Serviços auxiliares (como manutenção, inventário de peças de reparo, etc.) passam a

ser de responsabilidade do OEM, o que proporciona ao cliente uma maior oportunidade para se dedicar a seu negócio. Caso as regras estabelecidas no contrato não sejam cumpridas entre as partes, em geral, estabelecem-se penalidades que podem variar desde multas, até a quebra do contrato.

3.2.3 - PSS orientado ao resultado

Nesta modalidade de PSS, a relação entre OEM e cliente passa a ser regida predominantemente pela aquisição de artefatos intangíveis (neste caso, serviços). Ao invés de adquirir ou utilizar o ativo, o cliente passa a adquirir somente o resultado da utilização do ativo, enquanto que o OEM retém o direito de propriedade sobre o mesmo. Neste caso, a responsabilidade do OEM de garantir o funcionamento e a conservação do ativo, se torna ainda maior, já que nesta modalidade de PSS a indisponibilidade está diretamente associada a perda de rendimentos. Da mesma forma que nos casos anteriores, a relação de negócio entre OEM e cliente também deve ser estabelecida por meio de um contrato de serviços. O cumprimento dos termos estabelecidos entre ambas as partes é fundamental para a sustentabilidade desse modelo de negócio. A figura 3.2 mostra a classificação dos diferentes tipos de PSS.

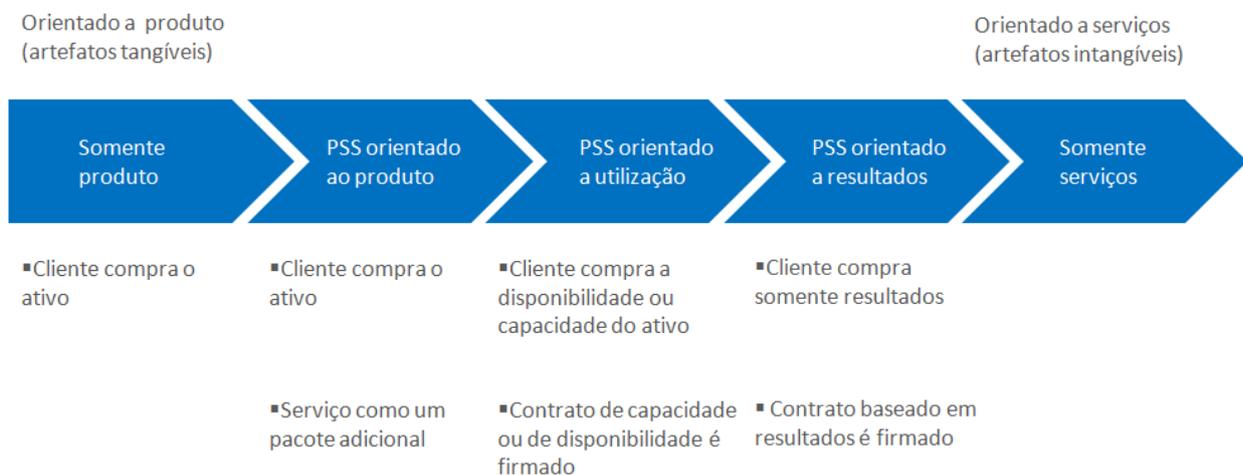


Figura 3.2: Tipos de PSS (adaptado de Tukker & Tischner, 2006)

3.3 - BENEFÍCIOS DO PSS

A transição de um modelo de negócio baseado somente na venda de produtos para a venda integrada de produtos e serviços deve oferecer um conjunto de vantagens para ambas as partes interessadas. Em outras palavras, o processo de co-criação de valores, elemento essencial para promover um modelo de negócio PSS na relação produção-consumo, acontece somente quando o fornecedor e o cliente estão a procura de novas medidas para otimizar seus respectivos índices de desempenhos. Desse modo, é importante compreender claramente quais são os potenciais benefícios de uma relação de negócios no PSS, tanto sob a perspectiva do cliente quanto sob o ponto de vista do fornecedor.

Sob o ponto de vista do cliente, a transferência de responsabilidade para o fornecedor é um dos principais atrativos para adotar o modelo de negócio PSS. Esta transferência de responsabilidade proporciona uma maior precisão na estimativa dos custos das atividades secundárias (aquisição de peças de reparo, consumíveis, manutenção, etc.). Contratos tradicionais de serviço são substituídos por contratos baseados em desempenho, em outras palavras, melhor desempenho do ativo implica em um aumento dos lucros do fornecedor PSS. Nesse sentido, o fornecedor PSS é incentivado a investir em otimização de resultados e, ao mesmo tempo, reduzir o custo do ciclo de vida dos ativos. A necessidade de otimizar o desempenho dos ativos foi um dos principais motivos que levaram o Ministério da Defesa (DoD) americano a substituir contratos tradicionais de serviços por contratos baseados em desempenho (PBL) (Gansler & Lucyshyn, 2006).

Embora a transferência de responsabilidades leve a um aumento de riscos para o fornecedor PSS, ela também promove um maior controle e eficiência sob a prestação de serviços. O cliente passa a depender muito mais dos serviços prestados pelo fornecedor, o que reduz consideravelmente a influência que os demais concorrentes possam ter sob a relação de negócios. Ao manter uma relação de proximidade com o cliente, o fornecedor PSS tem a oportunidade de conhecer de forma mais precisa as reais necessidades e expectativas de seus clientes, o que favorece o processo de proposição de soluções inovadoras. Em outras palavras, para o fornecedor, o PSS promove a oferta de soluções com um maior valor e mais diferenciáveis, ao passo que para o cliente é uma ótima oportunidade de transferir a responsabilidade sob os ativos (Baines *et al*, 2007).

3.4 - DESAFIOS PARA SE ADOPTAR O PSS

Embora um modelo de negócio PSS possa apresentar um conjunto de benefícios tanto para o fornecedor quanto para o cliente, sua aplicação ainda é vista com certo receio. Isto porque a mudança de oferta de produto para oferta de produtos e serviços requer uma transformação cultural e comportamental de ambas as partes envolvidas com o negócio (Mont, 2002). Por exemplo, no PSS o cliente deve concordar com a idéia de não possuir o ativo. Além disso, restrições quanto ao uso do ativo são também impostas pelo fornecedor para garantir os índices de desempenho estabelecidos no contrato de serviços. Todavia, muitos clientes não estão dispostos a abrir mão da propriedade do ativo, ou ainda limitarem a utilização do mesmo em função de restrições impostas pelo OEM.

Concorre com isso, a forte resistência do fornecedor em estender sua responsabilidade sob todo o ciclo de vida do ativo. Na maioria dos casos, o OEM não concorda com a idéia de trocar a venda do produto pela venda de utilização. A falta de alinhamento de medidas de desempenho entre o fornecedor e o cliente dificulta ainda mais obter uma clara visibilidade dos potenciais benefícios oriundos da adoção desse novo modelo de negócio. Ainda que as medidas de desempenho estejam disponíveis, elas não são tão óbvias sendo muitas vezes difíceis de quantificar (Phumbua & Tjahjono, 2011). De fato, para se estabelecer *value-in-use* como resultado para o cliente, o propósito e o objetivo do negócio deve ser diretamente atendido através da relação produto/serviço/consumo (Macdonald *et al*, 2009). Isto só é possível a partir da proximidade e da troca de conhecimento entre fornecedor e cliente. Todavia, muitas vezes o cliente não concorda com o compartilhamento de informações sobre seus processos por considerá-las sigilosas.

Ainda que fornecedor e cliente queiram migrar para o PSS, a falta de metodologias e estudos de casos concretos, muitas vezes, dificulta esta tomada de decisão. A maior parte das pesquisas atualmente disponíveis é desenvolvida somente no ambiente acadêmico, com proposições puramente teóricas que muitas vezes não são validadas por aplicações práticas ou industriais. Concorre com isso, a necessidade de se considerar as particularidades dos participantes envolvidos durante o projeto do modelo de negócio PSS, o que tem dificultado a proposição de métodos e modelos genéricos PSS. Faltam também ferramentas e métodos de modelagem e suporte que permitam não só projetar um modelo de negócio PSS, mas também monitorar seus resultados para que posteriores otimizações possam ser realizadas.

3.5 - CONCEITO DE PROGNÓSTICO E GERENCIAMENTO DA SAÚDE

Prognóstico e Gerenciamento da Saúde (PHM) é um importante programa para melhorar a segurança e a confiabilidade de componentes por meio de uma detecção inteligente e autônoma de falhas, da isolamento de falhas e da estimação do tempo de vida remanescente (RUL) de um dado componente com o objetivo final de reduzir custos operacionais (Shen *et al*, 2010). Um programa PHM mostra o potencial para endereçar problemas de confiabilidade que têm sido manifestados devido à complexidade de projetos, manufatura, condições operacional e ambiental e manutenção de equipamentos (Pecht & Jaai, 2010). Fabricantes têm sido cada vez mais induzidos a adotar um programa PHM para melhorar o desempenho de seus produtos, a disponibilidade, a eficiência e a efetividade em manutenção como forma de diferenciação de seus competidores (Grubic *et al*, 2011).

3.6 - FUNÇÕES DE UM PROGRAMA PHM

Um programa PHM é formado por um conjunto sistemático de funções que determinam o estado de saúde atual de um componente/sistema com base no monitoramento dos parâmetros do mesmo. Por causa das particularidades do modo de falha e dos princípios de operação que cada componente está sujeito, os procedimentos para se determinar o estado de saúde dos mesmos podem variar de programa para programa. Por este motivo, embora um dos principais objetivos de um programa PHM seja estimar o RUL, sua implementação sempre estará sujeita a uma aplicação em particular (Roemer *et al*, 2005). A figura 3.3 mostra o conjunto de funções que compõem um programa PHM.

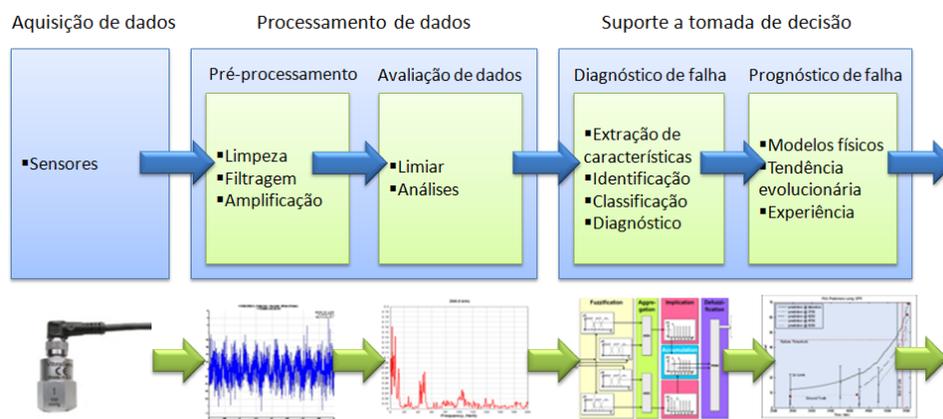


Figura 3.3: Funções de um programa PHM (Vachtsevanos *et al*, 2006)

3.6.1 - Aquisição de dados

Esta é a primeira etapa para se desenvolver um programa PHM. A aquisição de dados consiste, na maioria dos casos, em uma leitura periódica de uma ou mais grandezas físicas (isto é, temperatura, vibração, pressão, etc.) que estejam correlacionadas com o estado de saúde atual do componente/sistema analisado. O sensor, elemento responsável por esta leitura, realiza uma conversão da grandeza física em uma grandeza elétrica para que a mesma possa ser posteriormente processada. De acordo com a complexidade do componente/sistema avaliado, pode ser necessário realizar o monitoramento de diversos parâmetros durante toda a vida útil do ativo para obter as informações necessárias para a execução do programa PHM (Cheng *et al*, 2010).

Em geral, sensores possuem construções particulares e são escolhidos de acordo com a grandeza física que se deseja medir. Por exemplo, para se medir temperatura, sensores do tipo termopar ou termo-resistência são comumente utilizados. Para se medir vibração, acelerômetros construídos a partir de material piezo-elétrico são normalmente empregados. De acordo com as propriedades da grandeza que se deseja medir (isto é, faixa de operação, tempo de resposta, histerese, etc.) transdutores de fabricantes diferentes podem ser selecionados. Entretanto, independentemente do sensor que se deseja empregar, um das propriedades mais desejadas é um comportamento linear e uma elevada sensibilidade para a faixa de operação especificada.

3.6.2 - Processamento de dados

Nesta etapa, os sinais adquiridos pelos sensores, em geral, passam por um processo de amplificação, filtragem e transformação. Na fase de amplificação, o sinal adquirido pelo sensor é amplificado para ser posteriormente manipulado. Quando o sinal adquirido é analógico, amplificadores operacionais são comumente empregados no processo de amplificação. Na fase de filtragem, dados espúrios que não pertençam à faixa de operação do sensor, ou até mesmo que não sejam de interesse para análise, são eliminados. Este procedimento evita a contaminação da amostra analisada, o que normalmente leva a um erro de interpretação. Filtros ativos são elementos físicos comumente empregados na “limpeza” da amostra coletada. Dentre os filtros que podem ser empregados na “limpeza” do sinal estão: filtro passa-baixa, filtro passa-alta, dentre outros.

Diversos métodos, algoritmos e ferramentas podem ser empregados para se realizar a transformação e a análise dos dados. Em geral, transformações no domínio do tempo (como séries temporais, média síncrona temporal, etc.), no domínio da frequência (como FFT, STFT, dentre outras) ou no domínio do tempo e da frequência (por exemplo, transformada de Wavelets) são comumente empregadas no intuito de realizar uma posterior análise dos dados através da extração de características (Jardine *et al*, 2006). Uma vez que as características do sinal amostrado são identificadas, uma comparação com os padrões existentes, em geral armazenados em uma base de dados, permite estimar o estado de saúde atual do componente monitorado.

3.6.3 - Diagnóstico de falhas

O monitoramento condicional e o diagnóstico de falha são as primeiras funções aplicada por um programa PHM na etapa de suporte a tomada de decisões. No monitoramento condicional, as informações dos parâmetros dos ativos são interpretadas para identificar a mudança de estado ou tendência de degradação da saúde (Yam *et al*, 2001). Uma vez que os níveis de degradação da saúde previamente estabelecidos são alcançados, o operador ou o sistema de tomada de decisão são alertados. Já o diagnóstico de falhas consiste em determinar o tipo de falha à qual o sistema monitorado está sujeito, bem como seus respectivos detalhes (como a proporção da falha, a localização da mesma, dentre outras.) (Iserman, 2005). O diagnóstico de falha é composto por um conjunto de procedimento para detectar, isolar e identificar a condição de falha de um ativo, enquanto seus componentes críticos estiverem operando ainda que eles estejam em modo de degradação (Caesarendra *et al*, 2010).

A detecção é o primeiro estágio de um método de diagnóstico de falhas. Especificamente a detecção consiste em verificar uma alteração no estado de saúde do componente/ativo monitorado utilizando os dados oriundos da fase de processamento. Entre os métodos de detecção que mais se destacam estão a verificação de limites e testes de hipóteses (Lee, 2008). No primeiro caso, os dados advindos da fase de processamento são testados com base em limites estatísticos pré-estabelecidos. Uma vez que o dado coletado esteja fora dos limites estatísticos estabelecidos, um alerta é enviado para o operador ou para o sistema de controle notificando a possível existência de falha.

Caso uma falha seja detectada, ela deve ser isolada no estágio seguinte. A isolamento de uma falha consiste na habilidade do sistema de diagnóstico em distinguir diferentes tipos de falhas, o que obviamente depende do processo monitorado (Venkatasubramanian *et al*, 2003). O último estágio do diagnóstico de falha é denominado identificação. A identificação da falha é o processo em que características extraídas do sinal processado são comparadas com as já existentes (Jardine *et al*, 2006). Nesse sentido, as informações sobre a falha são comparadas com padrões já existentes, em geral, armazenados em uma base de dados. Com base nesta comparação, a falha anteriormente isolada é identificada para que se possa proceder com a tomada de decisões.

3.6.4 - Prognóstico de falhas

O prognóstico de falha pode ser definido como um método utilizado para prever o estado futuro de saúde de um componente/sistema, com base em seu estado de saúde atual, em sua lei de degradação, para que se possam investigar ações de manutenção que devem ser realizadas (Muller *et al*, 2008). O prognóstico de falha está relacionado com a utilização de métodos para detectar, diagnosticar e analisar a degradação do desempenho de sistemas antes que uma falha catastrófica aconteça, ou um nível de desempenho não aceitável seja alcançado (Peng *et al*, 2010). A partir de uma técnica de prognóstico é possível estimar o RUL com base no estado atual de degradação do sistema. Isto é particularmente importante para se escalonar as ações de manutenção de forma adequada. De fato, a informação de RUL pode ser utilizada para planejar, de forma antecipada, as atividades de manutenção que se façam necessárias (Banjevic, 2009).

As técnicas de prognóstico podem ser agrupadas em: baseada em modelos físicos, baseada em tendência evolucionária e baseada em experiência (Tran *et al*, 2008; Muller *et al*, 2008). De acordo com Vachtsevanos *et al* (2006), o prognóstico baseado em modelos físicos ainda são os mais exatos, já que eles podem proporcionar uma forma direta de se calcular o dano de um componente crítico baseado nas condições operacionais e na avaliação dos efeitos cumulativos em termos de utilização do componente. Além disso, a abordagem baseada em modelos físicos pode ser robusta para perda de sinais de sensores e ainda trabalhar sobre limitada sensibilidade do ambiente, entretanto, são relativamente caras (Daigle & Goebel, 2010).

Quando uma relação entre o mecanismo de evolução da falha e as condições operacionais do componente crítico é difícil de ser encontrada, a abordagem baseada em tendência evolucionária pode ser adotada (Teixeira *et al*, 2012). Esta técnica é frequentemente utilizada quando há uma tendência conhecida da evolução da falha. Modelo baseado em dados (*data-driven*) são comumente aplicados em uma abordagem baseada em tendência. Ele utiliza um mecanismo de aprendizagem (que pode ser treinamento supervisionado ou não-supervisionado) para compreender empiricamente a relação entre entradas e saídas sem considerar uma relação matemática explícita. Redes neurais (Wang *et al*, 2004) e lógica fuzzy (Al-Najjara & Alsyouf, 2003) estão entre as técnicas mais populares de *data-driven* para estimar o RUL.

Em alguns casos, não existe informação suficiente para se aplicar a abordagem baseada em tendência ou baseada em modelos físicos, especialmente quando os componentes críticos não podem ser monitorados por sensores ou quando a falha é intermitente. Nestes casos, a informação de falha do componente pode ser derivadas da folha de especificação do fabricante. Na abordagem baseada em experiência, dados históricos são coletados para determinar a distribuição de probabilidade e o MTBF. Embora esta seja uma abordagem simples, ela pode ser utilizada para auxiliar práticas de manutenção preventiva comumente realizadas em intervalos regulares (Byington & Roemer, 2009)

3.7 - BENEFÍCIOS DE UM PROGRAMA PHM

Os benefícios advindos com a adoção de um programa PHM vão além de proteger os ativos de falhas catastróficas ou não esperadas. Isto porque as empresas têm optado por desenvolver e adotar tecnologias de diagnóstico e prognóstico para melhorar o desempenho dos ativos, a disponibilidade e a eficiência da manutenção, o que também leva ao desenvolvimento de produtos diferenciados (Grubic *et al*, 2001). Além disso, os resultados da implantação de um programa PHM estão diretamente associados com a melhoria no projeto e com o desenvolvimento de sistemas em termos de confiabilidade, segurança, manutenção e logística, proporcionando uma redução do custo de vida dos ativos (Sun *et al*, 2010).

No que se refere à confiabilidade, as informações oriundas de um programa PHM são fundamentais para aumentar a confiabilidade dos ativos (Sun *et al*, 2010). Em outras palavras, o monitoramento da degradação da saúde permite que seja estabelecido, com certa precisão, quando o nível de degradação de um componente/subsistema irá atingir um limiar não aceitável.

Conseqüentemente, as falhas podem ser previstas evitando a ocorrência de interrupções não programadas, o que leva por conseguinte ao aumento da confiabilidade do ativo monitorado.

Em relação ao planejamento logístico e operacional, o monitoramento e a previsão de falhas promovem, de forma efetiva, ações de manutenção proativa. Uma vez que determinado nível de degradação da saúde de um ativo é atingido, a equipe responsável pela manutenção do ativo pode disparar, por exemplo, a aquisição de peças de reparo, o escalonamento de recursos, etc. Esta programação antecipada proporciona uma ação de manutenção mais efetiva, o que reduz de forma significativa o tempo de manutenção e os custos operacionais envolvidos. Isto é particularmente importante, já que 15-40% dos custos operacionais envolvidos com a utilização do ativo são atribuídos às atividades de manutenção (Kothamasu & Huang, 2007).

3.8 - DESAFIOS PARA ESTABELEECER UM PROGRAMA PHM

Apesar dos benefícios obtidos com a utilização de um programa PHM, inúmeros também são os desafios para colocar um programa PHM em prática. Primeiramente, nem todos os componentes/subsistemas possuem um modelo de falha, ou um conhecimento prévio dos níveis de degradação de saúde que podem ser considerados aceitáveis. Isto se deve ao mecanismo de degradação dos componentes críticos que, em geral, é particular para cada componente monitorado. Por esse motivo, embora o resultado de um programa PHM seja estabelecer uma estimativa do RUL, sua implementação sempre estará sujeita a uma aplicação em particular (Roemer *et al*, 2005).

Outro grande desafio associado ao desenvolvimento de um programa PHM é selecionar o método de prognóstico mais indicado para a aplicação em particular. Isto porque a escolha do método requer um balanço entre a incerteza inerente do processo de estimativa e da exatidão obtida com a técnica de prognóstico empregada. A falta de formalismo para tratar desse quesito tem incentivado pesquisas para desenvolver métodos híbridos de prognóstico para diferentes ativos, com o objetivo final de aumentar a exatidão da técnica empregada (Sun *et al*, 2010). Seguindo esta mesma linha, também tem sido proposto o desenvolvimento de modelos para o gerenciamento da incerteza da estimativa associado com algoritmos de estimativa do RUL (Uckun *et al*, 2008).

Outro ponto que dificulta, em particular, a utilização de técnicas de prognóstico é a ausência de métricas padronizadas para mensurar a efetividade dos resultados de predição obtidos. A falta de padronização se deve, muitas vezes, ao universo de requisitos (de usuário, de tempo, de informações disponíveis, de domínio, dentre outros) que devem ser concomitantemente atendidos (Saxena *et al*, 2008). Este universo de requisitos faz com que os engenheiros realizem avaliações de desempenho que lhes são convenientes. Contudo, a falta de uma avaliação concreta sobre o prognóstico de um sistema e a ausência de um adequado gerenciamento da incerteza, tem forçado a definição de especificações reais de desempenho (Saxena *et al*, 2009).

3.9 - CONCEITO DA INTERAÇÃO PSS-PHM

A interação PSS-PHM surge quando um programa PHM é utilizado para assistir um modelo de negócio PSS. O programa PHM somente é adotado quando houver uma necessidade inerente de se otimizar a utilização dos ativos (por exemplo nos casos em que alta disponibilidade e desempenho devem ser garantidos pelo OEM). Esta otimização pode ser traduzida em melhorias na capacidade de operação, na redução dos custos de manutenção e de logística ou na extensão do ciclo de vida dos ativos. Em particular quando a propriedade sobre o ativo é transferida do cliente para o OEM, o programa PHM pode ser utilizado para mitigar o risco, que de fato habilita o OEM a melhor entender os custos e as conseqüências relacionadas com as falhas bem como os benefícios que podem surgir com a implementação dessa tecnologia (Grubic *et al*, 2009).

Ao adotar o suporte de um programa PHM, as tomadas de decisões em um modelo PSS podem então ser realizadas considerando informações atuais do estado de saúde individual de cada ativo. Isto é particularmente útil na fase de execução do PSS, já que a degradação do ativo é função não somente das condições de operação, mas também das condições ambientais (Tu *et al*, 2007). Nesse sentido, o fornecedor PSS pode então estimar com maior precisão, por exemplo, quando peças para reparo devem ser adquiridas ou quando uma equipe de serviços de manutenção deve ser alocada, dentre outras. As vantagens obtidas com a utilização de um programa PHM (emissão de mensagens de falha antecipadas, extensão do ciclo de manutenção e reparo somente quando necessário, redução do número de inspeções) podem então ser incorporadas no modelo PSS e fornecidas ao cliente como um pacote de serviços e soluções. A figura 3.4 ilustra o conceito da interação PSS-PHM.

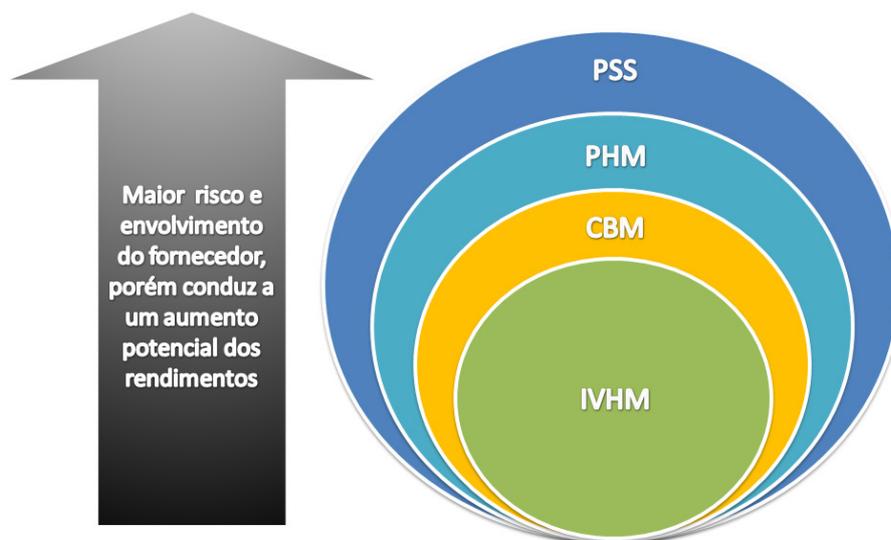


Figura 3.4: Conceito da interação PSS-PHM (adaptado de Redding, 2009)

O conceito da interação PSS-PHM surge a partir da evolução de uma série de outros conceitos, tecnologias e necessidades associadas. Em particular um programa PHM engloba os conceitos de tecnologias anteriores como: Gerenciamento Integrado de Saúde Veicular (IVHM) e Manutenção Baseada em Condição (CBM). Observa-se que esta evolução vem sendo provocada principalmente pela necessidade de se aplicar estas tecnologias a diferentes setores industriais (aviação, automotivo, etc.), como também para aumentar o envolvimento e promover uma transferência de riscos para os fornecedores. Este maior envolvimento e transferência de riscos para o fornecedor PSS, porém, leva a um aumento potencial de rendimentos e de novas oportunidades de negócio.

3.10 - EVIDÊNCIAS DA INTERAÇÃO PSS-PHM

Embora não exista um modelo ou uma definição formal que descreva a interação entre um programa PHM e um modelo de negócio PSS, a literatura tem demonstrado através de exemplos que os benefícios dessa interação podem ser estendidos além dos necessários para proteger o ativo de falhas catastróficas. De fato, a interação de um programa PHM com um modelo de negócio PSS promove novas oportunidades de negócio que podem ser, dependendo do caso, interessantes tanto para o cliente quanto para o fornecedor.

3.10.1 - Programa TotalCare

Um dos exemplos de sucesso que ilustra a potencialidade da interação entre o PSS e o PHM é o programa TotalCare® oferecido pela empresa Rolls-Royce. Este programa é definido pela Rolls-Royce como sendo “uma abordagem flexível para proporcionar um suporte de serviços para o motor corretamente alinhado com as necessidades específicas de cada cliente”. Neste programa, a Rolls-Royce não só oferece os motores da aeronave, como também um pacote de serviços (que pode incluir suporte operacional, reparo, reforma e gerenciamento das informações) para proporcionar um gerenciamento otimizado do ciclo de vida do motor quando o mesmo é entregue ao cliente até o fim de sua vida útil. O sucesso do programa é baseado na troca de conhecimento, experiência e informações entre o cliente e a empresa (Rolls-Royce, 2010).

Ao adquirir o pacote de serviços TotalCare®, o cliente transfere as incertezas associadas ao gerenciamento do motor para o OEM. Isto é particularmente interessante para ambos, já que permite que a companhia aérea estime com maior exatidão os custos associados com o gerenciamento preditivo dos motores, ao passo que abre uma nova oportunidade de negócio para a Rolls-Royce. De fato, o fabricante retém grande parte do conhecimento de engenharia de seus produtos, assim como da cadeia de suprimentos. Estes conhecimentos o habilitam a gerenciar de forma mais efetiva o ciclo de vida de seus motores, as interrupções para manutenção e a aquisição otimizada de peças para reparo. A transferência de risco da companhia aérea para o fabricante se torna particularmente importante já que os custos de manutenção do motor da aeronave e das peças de reparo vêm aumentando ao longo do tempo (Markou & Cros, 2012). A figura 3.5 ilustra um motor de aeronave desenvolvido pela empresa Rolls-Royce.



Figura 3.5: Motor de aeronave fornecido pela Rolls-Royce (Rolls-Royce, 2010)

Basicamente, o conjunto de serviços oferecidos por este programa se concentra em três modalidades:

- Suporte operacional;
- Reparação e reforma;
- Gerenciamento da informação;

O suporte operacional engloba um conjunto de atividades que incluem suporte técnico (assistência 24h/dia e 7dias/semana), gerenciamento do ativo, dentre outras. Esta modalidade tem como premissa proporcionar a máxima utilização da aeronave através da implantação de um programa de manutenção preditiva alinhado com a necessidade do cliente. Os serviços de reparação e reforma envolvem a execução de ações de manutenção planejadas e não-planejadas, assim como a disponibilidade de acessórios para a execução de reforma e reparo dos motores. Já o gerenciamento da informação envolve a implantação de um sistema de monitoramento da saúde do motor, de gerenciamento do motor e da disponibilidade de publicações técnicas.

3.10.2 - mt-iPSS

Sistema-Produto Serviço Industrial para Máquina Ferramenta (mt-iPSS) é um conceito proposto por Zhu *et al* (2011) no intuito de definir as premissas para se aplicar um modelo de negócios PSS para a provisão de máquinas-ferramentas CNC. Neste conceito, a capacidade da máquina-ferramenta e de seus acessórios é vendida como um pacote de serviços intangíveis ao cliente,

sendo esta venda realizada com ou sem a transferência de propriedade. De fato, no conceito mt-iPSS, o principal objetivo do negócio entre cliente e fornecedor é promover a venda da capacidade ao invés da transferência de propriedade do ativo. Nesse sentido, o provedor de serviços, normalmente, retém atividades auxiliares (como programa de manutenção) de tal forma a assegurar a utilização do ativo sobre um dado período de tempo (Azarenko *et al*, 2009).

A arquitetura proposta pelos autores é baseada em aspectos de hardware e software. Os aspectos de hardware englobam a máquina-ferramenta e seus acessórios para promover a capacidade de máquina. Já os aspectos de software incluem quatro camadas que são: 1- camada de aplicação, 2 - camada de módulo, 3 - camada de funcionalidade de sistema e 4 - camada de suporte de desenvolvimento. Em especial, a camada de módulo possui um configurador, um escalonador de processos de serviço, um habilitador de capacidade de máquina e um habilitador de manutenção da máquina. Em particular, o habilitador de manutenção da máquina é utilizado para diminuir o custo resultante da degradação do ativo e, portanto inclui um módulo de predição de falhas e um módulo de assistência dinâmica para efetivamente operar e manter as máquinas.

O módulo de predição de falhas, presente no habilitador de manutenção da máquina, é utilizado para auxiliar as atividades de manutenção e reparo das máquinas-ferramentas e para gerenciar consumíveis. A principal função desse módulo é auxiliar a tomada de decisão no que tange aos aspectos de manutenção e reparo. Basicamente, este módulo encapsula as mesmas funcionalidades de um programa PHM excluindo o prognóstico de falhas. Desse modo, ele é composto por um sistema de aquisição de dados, um sistema de análise e avaliação dos dados coletados e um sistema especialista baseado em raciocínio para realizar o diagnóstico de falha. Quando a falha não pode ser detectada, uma solicitação de assistência é enviada à equipe de manutenção e os resultados da aquisição são armazenados no banco de dados remoto.

3.10.3 - MATHS e LIKEMATH

As ferramentas de software *Machine Tool Health Simulation* (MATHS) e *Life-cycle risk Evaluation of Machine Tool Health* (LIKEMATH) foram desenvolvidas por Greenough & Grubic (2011) no intuito de investigar a aplicação do conceito de servitização (auxiliada ou não por um programa PHM) na indústria metal-mecânica. Ambas as ferramentas citadas foram desenvolvidas com base nos modelos de simulação computacionais SHOAM (*System Health*

Operations Analysis Model) e PICAM (*Probabilistic IVHM Cost-benefit Analysis Model*) desenvolvidas pela empresa Boeing e doadas ao centro de excelência IVHM da Universidade de Cranfield/UK.

O MATHS é um modelo de simulação a eventos discretos desenvolvido na plataforma Arena® da empresa Rockwell Automation. Este modelo encapsula um conjunto de parâmetros que incluem características de projeto de uma máquina-ferramenta (como confiabilidade, manutenibilidade, etc.), cenários operacionais (número de máquinas operando, tempo de ciclo de cada máquina, etc.) e a estratégia de serviço adotada (manutenção em intervalos escalonados, estoque de peças de reparo, dentre outras). Os dados de entrada para o modelo, assim como os resultados obtidos com a execução da simulação são armazenados em um conjunto de planilhas do Excel. De fato, os dados de saída obtidos com essa ferramenta servem como entrada para a ferramenta LIKEMATH.

A ferramenta LIKEMATH encapsula um conjunto de planilhas que recebe as informações do usuário e do MATHS para calcular os custos e os benefícios da solução adotada, seus impactos em termos de fluxo de caixa, o retorno de investimento, o valor presente líquido e a taxa interna de retorno. O modelo LIKEMATH deriva os custos e os benefícios para o cliente e para o fornecedor da máquina-ferramenta para desenvolver, produzir, operar e recondicionar uma máquina ferramenta com um programa PHM. Assume-se que o fornecedor compreende duas organizações: a primeira responsável pelo desenvolvimento e produção da máquina ferramenta (fabricante da máquina-ferramenta) e a segunda responsável pela entrega do serviço acordado através de um contrato (organização de serviços).

3.10.4 - Programa IVHM

O programa *Integrated Vehicle Health Management* (IVHM) foi proposto pela NASA em parceria com a empresa Boeing para monitorar a saúde de componentes críticos da aeronave X-37 (Schwabacher *et al*, 2002). Este programa tem como meta implementar um programa PHM para monitorar e avaliar, em tempo real, as funções de saúde do veículo, prever o RUL dos componentes críticos e utilizar essas informações para otimizar decisões operacionais e, possivelmente, de gerenciamento logístico (Benedettini *et al*, 2009). Isto significa que utilizando as informações do estado de saúde do veículo é possível desenvolver programas avançados de

manutenção e gerenciamento logístico que culminam na redução considerável de custos e riscos das missões espaciais (NASA, 2012).

O programa IVHM, inicialmente utilizado somente em aeronaves, tem ganhado cada vez mais força no mercado comercial. Fabricantes de soluções aeronáuticas (como a Boeing, BAE System, GE Aviation, etc.) têm investido massivamente em programas IVHM no intuito de obter vantagens competitivas em relação aos seus concorrentes. Por exemplo, para a empresa Boeing o programa IVHM (que nada mais é do que o programa PHM aplicado na aviação) é uma importante estratégia para melhorar a capacidade de operação, reduzir os custos de manutenção e de logística, assim como estender o ciclo de vida dos sistemas (Pecht, 2008). De fato, a implantação de um programa IVHM é particularmente interessante para grandes companhias aéreas que enxergam o emprego dessa tecnologia como chave para explorar novas oportunidades de negócio (Baines *et al*, 2009).

Um dos mais fortes incentivos comerciais para o programa IVHM é a mudança de contratos de manutenção tradicional para “logística baseada em desempenho”. Logística baseada em desempenho (PBL) é um modelo de negócio, inicialmente desenvolvido pelo Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos, que hoje vem sendo adotado cada vez mais por empresas do setor privado (Berkowitz *et al*, 2005). Neste novo modelo de negócio, estabelecido através de uma relação contratual entre as partes, a responsabilidade de gerenciar o ativo e promover a sustentabilidade do negócio é transferida do cliente para o fornecedor. Desse modo, o fornecedor é incentivado a aumentar a confiabilidade dos ativos, a reduzir o custo de inventário de peças para reparo e a otimizar a disponibilidade total do ativo. De fato, um programa IVHM pode ser utilizada para reduzir, substancialmente, riscos ao identificar e promover maiores informações sobre baixo desempenho de ativos, o que habilita engenheiros a responderem mais rapidamente a questões de desempenho levando a um contrato PBL mais rentável para os contratantes (Williams, 2006).

3.11 - IDENTIFICANDO A LITERATURA RELEVANTE

Baseado no questionário de pesquisa, uma revisão sistemática da literatura foi realizada. Um dos primeiros passos para conduzir a revisão foi selecionar as bases de dados que continham periódicos, conferências, livros, teses de doutorado, dentre outros. Embora muitas bases foram inicialmente consideradas, o GoogleScholar, SCIRUS, ScienceDirect, IEEE Explorer, Emerald

Insigth e o SCOPUS foram as utilizadas por serem completas e de fácil utilização. Um apropriado conjunto de palavras-chaves como “*Product-Service-System, Functional Sales, Integrated Product Service Offerings, Servitization, Prognostics and Health Management, Integrated Vehicle Health Management, Sensor Embedded Products e Cost and Benefits Analysis*” foi considerado. A primeira faixa de pesquisa abrangeu somente os 6 últimos anos (entre 2006 e 2012) no intuito de obter somente as publicações mais recentes relacionadas ao tema de pesquisa. Utilizando a faixa especificada e as combinações de palavras-chaves somente 23 artigos foram encontrados, o que sugere a necessidade de se empregar critérios de pesquisa mais abrangentes. A palavra “*Benefits and PHM*” também foi adicionada ao rol de palavras-chaves e a faixa de pesquisa foi expandida para doze anos (entre 2000 e 2012). Nesta nova faixa foram encontrados 136 artigos. Uma leitura do resumo de cada artigo reduziu este grupo para 48 artigos. Este procedimento foi executado para a combinação das palavras-chaves e de seus respectivos acrônimos. Finalmente 14 artigos foram considerados relevantes ao tema (ver tabela 3.1) sendo subseqüentemente empregados para guiar o desenvolvimento da pesquisa.

Tabela 3.1: Artigos mais relevantes e suas respectivas descrições.

| Referência | Descrição |
|-----------------------------|--|
| Greenough & Grubic (2011) | Investigam a relação entre um programa PHM e o conceito de servitização na indústria metal-mecânica. |
| Grubic <i>et al</i> (2011) | Pesquisa no Reino Unido para compreender as motivações, os benefícios e os desafios para empregar tecnologias de diagnóstico/prognóstico como elemento de competitividade. |
| Zhu <i>et al</i> (2011) | Conceito de Sistema-Produto Serviço Industrial para a indústria metal-mecânica. |
| Ilgin & Gupta (2010) | Avaliação de impacto da tecnologia SEP no desempenho de uma linha de desmontagem de equipamentos |
| Jazouli & Sandborn (2010) | Método para determinar os atributos não conhecidos de um sistema para cumprir uma restrição de disponibilidade específica. |
| Sun <i>et al</i> (2010) | Discussão detalhada dos benefícios das funções de prognóstico para um sistema. |
| Feldman <i>et al</i> (2009) | Propõe um modelo DES para obter o ROI de produtos eletrônicos com suporte de um programa PHM |
| Lee <i>et al</i> (2009) | Descreve como atividades de manutenção podem ser transformadas em funções de serviços. |
| Ondemir & Gupta (2009) | Justificativa econômica para desenvolver um DTO onde produtos com SEPs são desmontados. |
| Sandborn & Wilkinson (2007) | Metodologia para verificar diferentes programas PHM em sistemas com um ou mais sockets. |
| Scanff <i>et al</i> (2007) | Modelo estocástico para prever o impacto do custo do ciclo de vida associado a um programa PHM aplicado a helicópteros. |
| Khalak & Tierno (2006) | Investiga o problema de determinar métricas de desempenho para um programa <i>preemptivo</i> de manutenção baseada em condição (programa PHM). |
| Willians (2006) | Descreve os benefícios de um programa IVHM. |
| Malley (2001) | Metodologia para modelar um programa PHM em um Simulador Autônomo para Logística. |

3.12 - DESCRIÇÃO DOS FUNDAMENTOS

Neste tópico estão descritos os principais fundamentos obtidos com base na revisão da literatura. Os fundamentos a serem apresentados fornecem uma resposta preliminar às perguntas apresentadas no objetivo da tese (item 1.1). A análise dos fundamentos define uma agenda de pesquisa sobre o tema proposto, sendo esta agenda utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

3.12.1 - Típico cenário para se adotar uma solução PSS-PHM

Serviços estão se tornando o primeiro diferenciador para as empresas que estão adotando modelo de negócios orientado a serviços. Embora prevalente, a provisão de serviços não tem sido necessariamente limitada às tradicionais práticas de suporte, mas principalmente a uma oferta de solução integrada (Tan *et al*, 2009). Oferecer serviços baseados no *value-in-use* conduz a uma melhor utilização do desempenho dos ativos, assim como muitas operações e possibilidades habilitando o consumidor a concentrar seu foco em suas competências ao terceirizar atividades secundárias (Meier *et al*, 2010). A oferta de produtos e serviços integrados vai além de aumentar lucros. Ela ajuda a promover diferenciação e diversificação de produtos para melhor responder as necessidades dos clientes (Sundin *et al*, 2009) ao criar uma relação de proximidade com os mesmos (Sundin, 2009).

A venda funcional de disponibilidade (PSS orientado a utilização) ou de resultados (PSS orientado a resultados) requer uma constante otimização do uso dos ativos para alcançar a sustentabilidade do negócio (Yang *et al*, 2009). Nestes casos, dados de monitorando condicional do ativo, tipicamente, promovem uma melhoria nos índices de desempenho e no escalonamento das atividades de manutenção e reparo assegurando uma utilização dos ativos mais otimizada (Baines *et al*, 2009). É evidente que existem soluções baseadas em serviços que não comportam o monitoramento condicional ou dados de saúde do ativo como o InterfaceFLOR (InterfaceFlor, 2011) e o Parkersell (Parkesell, 2011). Dados de monitoramento são particularmente importantes quando interrupções não-programadas em ativos com alto valor agregado podem levar a uma falha geral de sistema, a prejuízos, a risco para o ambiente ou para vida de pessoas (Tu *et al*, 2007).

Fundamento 01: O cenário que leva a adoção de uma solução PSS-PHM tipicamente é definido pelas necessidades das partes envolvidas no modelo de negócio. Para o consumidor quando o desempenho total dos ativos (isto é, elevados índices de disponibilidade/capacidade) é necessário e pode ser garantido pelo OEM. Para o fornecedor quando a garantia de desempenho se torna uma vantagem competitiva com o objetivo final de melhorar o valor do negócio e suas respectivas proposições.

3.12.2 - Gerenciamento comportamentos dinâmicos em modelos PSS

Comportamentos dinâmicos estão relacionados a ocorrência de eventos que não podem ser preditos (isto é, perturbações, condições anormais ou extremas que os ativos estão sujeitos) mas que afetam o cumprimento das metas estabelecidas em um modelo de negócio PSS. Diferentemente de modelos de negócio baseado puramente na venda de produtos, no PSS é fundamental que o OEM tenha um claro entendimento dos riscos associados a ocorrência de comportamentos dinâmicos para então mitigá-los. De acordo com Phumbua & Tjahjono (2011), comportamentos dinâmicos englobam, por exemplo, mudança de requisitos do cliente, falha nos ativos, flutuações na demanda e mudança de mercados. Comportamentos dinâmicos são ainda mais críticos quando ocorrem durante a execução do PSS. Por esta razão, a avaliação de contratos de serviços em curto prazo se torna ainda mais difícil devido a limitada visibilidade do nível de confiabilidade atual dos ativos.

No que se refere a confiabilidade dos ativos, um modelo de negócio PSS tipicamente leva o OEM a assumir o risco de falhas e também a se comprometer a melhorar a capacidade de utilização (Oliva & Kallenberg, 2003). Entretanto, durante a execução do PSS condições operacionais e ambientais podem afetar o tempo de vida esperado dos ativos. Como o monitoramento condicional é o processo básico para estimar a probabilidade de falha de um sistema que ainda está operando (Brenna, 2007), os dados de um programa PHM servem como base para guiar ações proativas, para reduzir as perturbações causadas por comportamentos dinâmicos proporcionando um gerenciamento mais robusto de contratos de serviços.

Um efetivo programa PHM ajuda a aumentar a confiabilidade dos ativos e a segurança com base no conceito de logística autônoma (Banks *et al*, 2005). Este conceito classifica um programa PHM como uma resposta autônoma para reagir com antecedência a problemas potencialmente não preditos. Como consequência, o fornecedor PSS pode avaliar, com maior precisão, a possibilidade de suportar novas demandas do cliente. Ainda que o fornecedor não consiga garantir, por exemplo, o mesmo nível de disponibilidade operacional, ao menos uma possível redução na disponibilidade pode ser negociada com o cliente. Se esta modificação pode ser feita sem afetar de forma significativa os resultados almejados, a utilização estendida do ativo pode ser tornar útil para ambas as partes.

Fundamento 02: As informações fornecidas por um programa PHM constituem um poderoso mecanismo para gerenciar comportamentos dinâmicos em modelos de negócio PSS. Este mecanismo promove o tratamento de eventos não-preditos que ocorrem durante a execução do PSS. Um programa PHM propicia uma captura de dados mais confiáveis dos ativos, podendo estes dados serem utilizados pelo plano operacional PSS para que se possa analisar os efeitos dos comportamentos dinâmicos.

3.12.3 - Medidas de desempenho sobre a interação PSS-PHM.

Empresas que ofertam soluções baseadas em serviços, normalmente possuem diferentes objetivos de negócio e indicadores de desempenho (Tan *et al*, 2009). Ainda que os indicadores não sejam os mesmos, elas ainda buscam eficiência e efetividade para alcançar os requisitos do negócio estabelecido. Da mesma forma, valor em serviços e diferenciação em um PSS são tipicamente alcançados através da otimização de desempenho e da utilização ao invés da transferência de propriedade (Baines *et al*, 2007). Em outras palavras, *value-in-use* pode ser traduzido em maximizar a utilização dos ativos e ao mesmo tempo reduzir o custo do ciclo de vida dos mesmos (Yang *et al*, 2009) (Colen & Lambrecht, 2010).

Medidas de desempenho associadas a utilização dos ativos podem guiar a tomada de decisões durante toda execução do PSS. Medidas de desempenho são consideradas fatores críticos a serem constantemente observados devido a expectativa do cliente (meta de desempenho) e a execução oferecida pelo fornecedor (como é alcançada) (Kim *et al*, 2009). Na fase de projeto do

PSS, existe uma forte relação entre os indicadores de desempenho dos ativos e o valor do negócio. Além disso, medidas de desempenho dos ativos guiam o OEM no planejamento das atividades de serviços a serem executadas.

Entre as medidas de desempenho mais reconhecidas por clientes e fornecedores está a disponibilidade (Lindahl *et al*, 2005). A disponibilidade especifica a habilidade de um ativo (sujeita a aspectos combinados de confiabilidade, manutenibilidade e de suporte a manutenção) em desenvolver suas funções num certo instante de tempo ou sobre um período inicial (Rausand & Hoyland, 2004). A disponibilidade está associada diretamente com o período de tempo em que o ativo está em operação (Fleischer & Nesges, 2006). A intensa utilização de ativos é particularmente desejada em contratos *pay-for-use*, já que nestes casos existe uma relação direta entre utilização e geração de lucros (Slack, 2005). Atualmente, a disponibilidade do ativo medida durante a execução do PSS (isto é, a disponibilidade operacional) é predita durante a fase de projeto do PSS utilizando distribuições de probabilidade e informações de MTBF e MTTR. Esta avaliação considera que estes parâmetros possuem valores constantes ao longo do tempo (Torell & Victor, 2004). Entretanto, os efeitos de comportamentos dinâmicos combinados com mudanças nas condições ambientais e operacionais podem modificar a vida útil esperada e a confiabilidade do ativo. Nestes casos, a disponibilidade operacional esperada não necessariamente é a mesma obtida na prática.

Embora seja reconhecido que um programa de manutenção preditiva requer um alto investimento inicial para ser implementado, quando bem implantado e gerenciado, é considerado o método mais efetivo para gerenciar riscos e promover o melhor retorno de investimento relacionado aos ativos (Da Silva *et al*, 2008). Isto porque com um programa PHM, os efeitos dos comportamentos dinâmicos podem ser capturados e considerados nas tomadas de decisões. Além disso, a confiabilidade atual do ativo pode ser mais precisamente estimada e utilizada para atualizar a disponibilidade operacional corrente. Com base nas informações fornecidas, estabelece-se o seguinte fundamento.

Fundamento 3: Disponibilidade é uma das principais medidas de desempenho em modelos de negócio PSS, por se tornar uma valiosa referência tanto para o cliente quanto para o fornecedor em suas respectivas tomadas de decisões. Uma vez que um modelo de negócio PSS estiver sendo executado, os resultados de um programa

PHM podem ser utilizados para atualizar a confiabilidade atual e promover ações proativas para garantir a disponibilidade operacional almejada.

3.12.4 - Alcançando de forma mais efetiva a interação PSS-PHM.

O projeto efetivo de um sistema é considerado uma tarefa desafiadora já que o projetista possui visibilidade limitada das condições ambientais e de funcionamento dos ativos. Nestes casos, técnicas de modelagem e simulação têm sido tradicionalmente utilizadas na validação de sistemas/subsistemas projetados, de tal forma a proporcionar o aumento de desempenho dos mesmos (Ingemansson *et al*, 2002). Uma simulação pode imitar o que acontece na realidade e ser capaz de apresentar resultados similares aos obtidos de sistemas reais (Banks *et al*, 2009). Simulações podem ser intuitivas e visualmente atraentes para o apoio e o suporte as tomadas de decisões (Benedettini & Tjahjono, 2009). Por este motivo, modelagem e simulação é uma das técnicas mundialmente reconhecidas no suporte de projetos de modelos de negócio PSS.

Entretanto, conforme verificado por Phumbua & Tjahjono (2011) ferramentas de modelagem e simulação são comumente empregadas somente durante a fase de projeto do PSS. Além disso, na modelagem tradicional a eventos discretos a incerteza associada ao tempo de vida dos ativos é expressa somente por distribuições probabilísticas e variações aleatórias. Todavia, durante a execução do PSS eventos não-preditos (como sobrecarga de ativos devido a condições ambientais extremas, utilização imprópria, etc.) podem afetar, de forma significativa, o tempo de vida esperado dos ativos. Os efeitos dessas mudanças, infelizmente, não podem ser precisamente preditos somente utilizando variações aleatórias e informações de MTBF. Contudo, qualquer atividade de manutenção que não considera modificações nas condições operacionais e ambientais leva a falhas não programadas de componentes e de sistemas (Markeset & Kumar, 2003).

Como não há acoplamento direto entre as simulações e o sistema real, quando o sistema é implementado já não há mais necessidade de se utilizar a simulação. Por este motivo, as simulações são comumente executadas a partir de um estado inicial e vazio. Quando a simulação alcança o estado estacionário, experimentos podem ser feitos e vários *what-if* cenários podem ser testados. Entretanto é comum acontecer do estado da simulação não corresponder necessariamente ao estado atual do sistema e quantificar/qualificar a equivalência entre estes

estados tem se tornado uma tarefa desafiadora. Uma das possíveis soluções para promover este alinhamento é acoplar a simulação ao sistema real em um modo de execução online.

Simulação online (ou simulação em tempo real como também é conhecida) utiliza um mecanismo de *feedback* para acoplar a simulação com o sistema real. Esta técnica utiliza um princípio similar ao adotado em sistemas de controle em tempo real, em que a simulação recebe informações do sistema real através de um processo de realimentação. Uma das características que distingue a simulação online das demais é a captura do estado do sistema real que se torna os dados de entrada da simulação. Isto habilita a simulação a ser utilizada não somente durante a fase de projeto do PSS, mas principalmente durante a fase de execução do PSS como uma ferramenta de planejamento operacional.

Simulações online incorporam dados de sistemas do mundo real para promover ações de controle de forma mais eficiente, exata e precisa (Song *et al*, 2008). O controle em tempo real proporcionado por uma simulação online permite identificar, por exemplo, problemas em sistemas produtivos com o intuito de aumentar a capacidade de reação dos mesmos (Mirdamadi *et al*, 2007). Na simulação online, o tempo de execução da simulação pode ser comprimido ou estendido, de acordo com o horizonte que se deseja analisar, de tal forma a identificar perturbações, antecipar riscos e proporcionar somente as reações de controle necessárias. A figura 3.6 mostra o uso da simulação online para promover a interação PSS-PHM.



Figura 3.6: Simulação online para promover a interação PSS-PHM

Uma vez que um modelo de negócio PSS (com cláusulas contratuais de garantia de desempenho) é estabelecido, o fornecedor PSS pode então utilizar uma simulação online para gerenciar, mais precisamente, a utilização dos ativos e assim evitar falhas catastróficas. O fornecedor pode verificar em um curto espaço de tempo (horas, dias, semanas) a confiabilidade dos ativos e o plano operacional de execução das atividades e, se necessário, modificar este para que as metas estabelecidas no contrato possam ser satisfatoriamente cumpridas (ver figura 3.6). Dessa forma, a interação PSS-PHM promovida a partir de uma simulação online proporciona um mecanismo de tomada de decisão mais proativo, capaz de melhor suportar o cumprimento dos requisitos de negócio.

Fundamento 04: A técnica de simulação online mostra um potencial expressivo para ser utilizada como ferramenta de avaliação proativa e de controle durante a execução do PSS. Para tanto, a simulação deve estar acoplada com ativos reais para que as condições operacionais dos mesmos possam ser capturadas e consideradas durante a execução da simulação. Um programa PHM fornece as informações necessárias para alinhar os estados dos ativos com suas respectivas representações na simulação fazendo com que decisões operacionais em um modelo de negócio PSS possam ser mais confiáveis e creíveis.

3.12.5 - Reavaliação das estratégias de negócio em modelos PSS

A entrega de uma solução combinada de produtos e serviços, em geral, está vinculada a uma relação de responsabilidades e obrigações estabelecidas durante toda a execução do PSS. Desse modo, a efetividade na execução do PSS requer uma integração inter-organizacional somente alcançada através de um adequado gerenciamento de recursos (manutenção, peças para reparo e sistema logístico) (Baines *et al*, 2007; Baines *et al*, 2009). Ao incorporar as atividades auxiliares em seu modelo de negócio, o fornecedor PSS mantém uma relação duradoura e de proximidade com seus clientes além de reduzir a ação de competidores (Colen & Lambrecht, 2010).

A decisão de vender uma solução integrada de produtos e serviços deve ser analisada cuidadosamente durante a fase de projeto do PSS. Uma vez que uma solução com garantias de desempenho é vendida, o fornecedor PSS deve ser capaz de verificar, continuamente, se os índices de desempenho estabelecidos (isto é, disponibilidade, confiabilidade, custo do ciclo de

vida, dentre outros.) podem ou não ser alcançados considerando a capacidade atual dos ativos. Sem esta capacidade, um fornecedor PSS assume o risco de fazer escolhas imprecisas para as próximas fases do ciclo de vida dos ativos levando a possíveis penalidades e, no pior caso, ao rompimento da relação com o cliente. Por exemplo, em se tratando de manutenção, o planejamento da execução das atividades de reparo se torna uma importante premissa na contribuição para um desempenho de negócio positivo (Waeyenbergh & Pintelon, 2004).

Todavia, somente os dados de monitoramento condicional não são suficientes para se realizar tomadas de decisões. Determinar o melhor curso das ações requer outros critérios como disponibilidade, manutenção e custo do ciclo de vida (Feldman *et al*, 2009). Em outras palavras, a capacidade de monitorar o estado atual de saúde dos ativos está além de proteger o mesmo de falhas catastróficas. Ela habilita uma capacidade de tomada de decisão mais robusta tanto durante a utilização do ativo (Iyer *et al*, 2006) quanto no final de sua vida útil (Ilgin & Gupta, 2010) ainda que o mesmo esteja sujeito a perturbações. Contudo, quando a incorporação de estratégias para reações a perturbações é necessária, o OEM que adotar uma solução PSS-PHM adicionará maior valor em seu modelo de negócio. Isto é particularmente importante para garantir o alcance de requisitos (como alta disponibilidade ou capacidade) estabelecidos durante a fase de projeto do PSS.

Um programa PHM pode melhorar a manutenção e ao mesmo tempo aumentar a segurança dos ativos, tornando-os mais confiáveis. Esta vantagem permite que o OEM avalie e redefina suas estratégias de serviços (como escalonamento das ações de manutenção, políticas de inventário de peças para reparo, etc.) sempre que necessário. Utilizando os dados de um programa PHM, avaliações mais confiáveis em modelos PSS podem ser feitas. Desse modo, requisitos de projetos podem ser constantemente reavaliados, sendo os resultados utilizados em contratos subseqüentes. Esta reavaliação proporciona uma maior oportunidade para as empresas melhorarem seus produtos (isto é, reduzir a necessidade de serviços em todas as fases de utilização, descobrir erros de projeto mais rapidamente, melhorar o conhecimento sobre um produto, etc.) (Sundin & Bras, 2005). Em geral, isto promove um melhor entendimento do custo do ciclo de vida do ativo para o cliente (Sun *et al*, 2010). Em suma, utilizando um programa PHM, o risco associado com a avaliação da disponibilidade/capacidade de contratos pode ser reduzido (Jazouli & Sandborn, 2010)

Fundamento 05: A assistência promovida por um programa PHM permite reavaliar as estratégias de negócios em modelos PSS. A partir desta interação, os índices de desempenho definidos no modelo de negócio podem ser continuamente atualizados com base nos dados mais recentes obtidos dos ativos. Por este motivo, esta interação se torna essencial quando for necessário aumentar a controlabilidade sobre a execução dos contratos e capturar as modificações necessárias promovendo um modelo de negócio PSS mais sustentável.

3.13 - ANÁLISE DOS FUNDAMENTOS

Nesta seção é apresentada uma análise detalhada dos principais fundamentos e uma discussão do estado da arte sobre a interação PSS-PHM, a capacidade das técnicas e das ferramentas atualmente existentes e uma avaliação de modelos de negócio PSS com ou sem a assistência de um programa PHM.

3.13.1 - Apoio à tomada de decisões no PSS utilizando um programa PHM

Ainda que a literatura atual reconheça que um programa PHM pode assistir alguns modelos de negócio PSS, esta interação ainda não foi completamente investigada. Em geral, as pesquisas têm investigado programas PHM somente do ponto de vista tecnológico, sem se preocuparem com o valor adicionado para fins de negócio. Além disso, as pesquisas em modelos de negócio PSS têm investigado a assistência promovida por um programa PHM somente durante a modelagem do negócio, sem explorarem o potencial benefício desta interação para assistir a decisões durante a execução do PSS. Estudos de casos com dados da indústria, resultados experimentais e análises numéricas também são necessários para proporcionar uma análise mais confiável da execução do PSS.

A adoção de um programa PHM é essencialmente guiada pela necessidade de se acessar o estado de saúde dos ativos. Com as informações do estado de saúde, modificações não esperadas no tempo de vida dos ativos podem ser capturadas e consideradas pelas equipes de serviços. Desse modo, decisões operacionais realizadas durante a execução do PSS podem ser revistas e modificadas de acordo com a real necessidade. Isto permite que mudanças confiáveis de curto período do plano operacional do PSS possam ser implementadas para alcançar os requisitos

específicos do negócio. Isto é particularmente desejado em contratos baseados em desempenho (PBC), em que o cliente remunera o fornecedor de acordo com o número de horas em que o ativo está disponível para utilização (Guajardo *et al*, 2011).

As pesquisas têm demonstrado que valor em modelos de negócio baseados em serviços é conquistado com desempenho ou utilização dos ativos ao invés do direito de posse (Teixeira *et al*, 2013). *Value-in-use* qualitativamente derivado das necessidades dos clientes são freqüentemente incorporados em muitos modelos de negócio, porém indicadores de eficiência em serviços (como disponibilidade do ativo, tempos operacionais e confiabilidade funcional) não são comumente encontrados (Phumbua & Tjahjono, 2011). Apesar disto, disponibilidade do ativo tem sido reconhecida como um forte indicador de desempenho para avaliar a execução do PSS. Alta disponibilidade combinada com alta taxa de utilização pode resultar em geração direta de lucros.

3.13.2 - Capacidade das ferramentas e técnicas atuais de modelagem.

Esta seção analisa a capacidade das ferramentas e técnicas de modelagem atualmente existentes. Em primeiro lugar, parece não existir ferramentas e técnicas de modelagem que utilizam os resultados de um programa PHM para analisar a execução de modelos de negócio PSS. As ferramentas existentes são, em grande parte, orientadas para a fase inicial e de definição do modelo de negócio PSS com resultados em longo prazo sobre uma vasta gama de cenários contextuais. Estas ferramentas de simulação modelam os dados obtidos de um programa PHM com muitas suposições teóricas, que na maioria das vezes, não podem ser verificadas na prática. Por outro lado, decisões operacionais devem ser avaliadas em curto espaço de tempo e baseadas no estado atual dos ativos (Wynn *et al*, 2008), devendo portanto incorporar os dados obtidos de um programa PHM. Isto permite a construção de ferramentas que podem ser utilizadas para avaliarem a execução do PSS, em particular, quando os mesmos estiverem sob os efeitos dos comportamentos dinâmicos.

Uma ferramenta de simulação online permite tratar comportamentos não previstos e mudanças de requisitos em toda a fase de execução do PSS. Por exemplo, a equipe de serviços pode utilizar as informações dos estados dos ativos para decidir quais componentes críticos devem ser trocados e quando os componentes para reposição devem ser adquiridos. Estes benefícios

também podem ser estendidos para outras atividades do PSS (como re-manufatura) proporcionando uma estimativa mais precisa do tempo de alocação das equipes de serviço. Sem ferramentas de simulação apropriadas, o OEM pode recusar novas oportunidades de negócio devido a incerteza e aos riscos associados. Por esta razão, simulações que incorporem dados reais dos ativos são desejadas, já que ao atualizar a simulação com dados obtidos de um programa PHM, a representação dos ativos se torna ainda mais fidedigna levando a resultados mais confiáveis. Isto significa que decisões em curto prazo podem ser feitas ou modificadas para reagir adequadamente a comportamentos dinâmicos, como forma de garantir o cumprimento das metas estabelecidas durante o projeto do modelo de negócio PSS.

3.13.3 - Comparando modelos de negócio PSS com e sem a assistência PHM

A terceira análise realizada nesta seção compara modelos de negócio PSS com e sem a assistência de um programa PHM. Em primeiro lugar, nem todos os modelos de negócio PSS analisados requerem a incorporação de um programa PHM. Em alguns casos, o investimento inicial para implantar o programa é superior as expectativas das partes interessadas. Também existem casos em que o modelo de falha dos componentes críticos ou dos subsistemas é desconhecido. Nestes casos, as interrupções dos ativos são programadas somente utilizando os resultados das simulações obtidos durante o projeto do PSS.

Entretanto, requisitos operacionais e interações são altamente complexos e não podem ser completamente preditos. Além disso, novas requisições dos clientes ou variação de desempenho dos ativos podem ocorrer durante a execução do PSS. Desse modo, ao utilizar um programa PHM é possível avaliar, por exemplo, como novas demandas operacionais podem ser atendidas sem se penalizar os índices de desempenho estabelecidos. Portanto, combinar métodos tradicionais para análise de modelos de negócio PSS (modelagem e simulação) com programas PHM pode se tornar uma solução efetiva para modelos de negócio mais complexos. Ferramentas de simulação existentes podem ser personalizados para trabalharem no modo online.

3.13.4 - Forças, fraquezas e oportunidades sobre a interação PSS-PHM

Com base na descrição e na análise dos fundamentos, uma análise de forças fraquezas, oportunidades e ameaças (análise SWOT) sobre a interação PSS-PHM é realizada. O resultado desta análise é então especificado na tabela 3.2. Observa-se que o item “ameaças” foi suprimido da tabela, já que as “ameaças” serão investigadas e devidamente documentadas como limitações ao final deste trabalho.

Tabela 3.2: Análise SWOT sobre a interação PSS-PHM

| <i>Forças</i> | <i>Fraquezas</i> |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Clara compreensão dos benefícios obtidos com um programa PHM;- Clara definição dos requisitos de um modelo de negócio PSS;- Existência de pesquisa sobre a interação PSS-PHM;- Consenso de que não existe pesquisa suficiente que investigue a interação PSS-PHM; | <ul style="list-style-type: none">- Ausência de ferramentas computacionais para avaliar tomadas de decisão durante a execução do PSS;- Ausência de estudos sobre comportamentos dinâmicos durante a execução do PSS;- Ausência de pesquisas que descreva sistematicamente como realizar a interação PSS-PHM; |
| <i>Oportunidades</i> | |
| <ul style="list-style-type: none">- Definição de novos métodos e estratégias para suportar decisões em curto prazo a serem realizadas durante a execução do PSS;- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional que promova a interação PSS-PHM através do paradigma de simulação online;- Investigação numérica para avaliar qualitativamente como um programa PHM pode assistir decisões operacionais em modelos de negócio PSS;- Métodos para atualizar os KPIs considerando o estado atual dos ativos;- Estudo de caso industrial para avaliar a interação PSS-PHM; | |

No que se refere ao item “forças”, a clara compreensão dos benefícios de um programa PHM e uma definição sistemática dos requisitos de um modelo de negócio PSS são os itens que mais se destacam. Embora existam pesquisas sobre a interação PSS-PHM há um consenso de que não existem trabalhos suficientes que investiguem esta interação. Com relação as “fraquezas”, os métodos e os procedimentos para assistir decisões operacionais estão entre os principais itens.

Aliado a isto, estudos sobre os efeitos de comportamentos dinâmicos sobre modelos de negócio PSS também devem ser realizados. Por este motivo é desejado o desenvolvimento de um *framework* para a integração PSS-PHM sob um ambiente computacional. Ao utilizar o *framework*, o fornecedor PSS pode então construir simulações e prever a necessidade de recursos operacionais considerando o estado de saúde atual de cada ativo.

Em relação as “oportunidades” novos métodos, procedimentos e técnicas são necessárias para suportar decisões operacionais durante toda a execução do PSS. Ferramentas de simulação computacional que incorporem o estado de saúde dos ativos na simulação também são necessárias. Isto permite que variações de desempenho não esperadas devido a ocorrência de comportamentos dinâmicos sejam agregadas à simulação. Utilizando estas ferramentas, o fornecedor PSS realiza decisões mais acertadas reduzindo os custos operacionais e as chances de se descumprir as metas estabelecidas no modelo de negócio. Uma vez que estas novas técnicas e ferramentas estiverem disponíveis, estudos de casos industriais deverão ser realizados para validar quantitativamente as vantagens promovidas pela interação PSS-PHM.

3.14 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreve a revisão da literatura realizada sobre o tema de pesquisa proposto. Os conceitos do PSS e do PHM, seus benefícios e respectivos desafios são inicialmente apresentados. Uma pesquisa detalhada identifica a literatura relevante sobre a interação PSS-PHM. Com base na literatura relevante, fundamentos associados ao tema de pesquisa são propostos. A análise dos fundamentos identifica uma agenda de pesquisa utilizada por este trabalho. O capítulo seguinte apresenta a metodologia de pesquisa científica adotada.

4 - METODOLOGIA DE PESQUISA CIENTÍFICA

Este capítulo descreve a metodologia de pesquisa científica adotada neste trabalho. Desse modo, este capítulo tem como principal objetivo especificar como o tema de pesquisa será investigado. A metodologia científica adotada é composta por um conjunto de etapas a serem seguidas e executadas. As etapas devem ser executadas sequencialmente para que o resultado produzido na etapa anterior seja utilizado na etapa seguinte.

4.1 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia científica adotada neste trabalho é formulada a partir da execução seqüencial de um conjunto de etapas relacionadas ao tema de pesquisa. A figura 4.1 ilustra esquematicamente as seqüência das etapas a serem seguidas para se investigar a interação PSS-PHM.

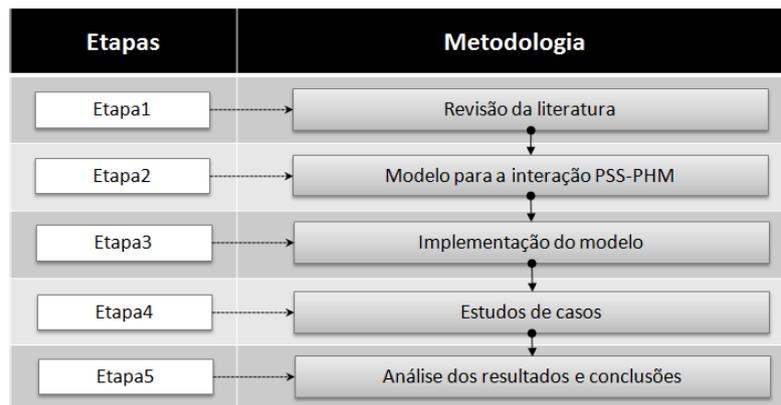


Figura 4.1: Especificação da metodologia científica adotada

4.1.1 - Etapa 1: Revisão da Literatura

A revisão da literatura tem por finalidade promover uma compreensão sobre as principais questões relacionadas ao tema de pesquisa. Por se tratar de um tema de pesquisa multidisciplinar, a revisão da literatura é estrategicamente dividida em duas fases: 1 – revisão sob o contexto e 2 – revisão detalhada. A primeira fase (item 3.1 a 3.8 do capítulo 3) apresenta o tema de pesquisa sob um contexto geral sem investigar em detalhes a interação PSS-PHM propriamente dita. A revisão sob o contexto é necessária para compreender individualmente os conceitos do PSS e do PHM e os seus respectivos benefícios e desafios associados.

O conceito do PSS é inicialmente investigado no item 3.1 (capítulo 03). Modelos de negócio PSS são definidos e distinguidos dos tradicionais modelos de negócio. Os diferentes tipos de PSS são também especificados sendo posteriormente especificados os benefícios e os desafios associados aos modelos de negócio PSS. Já o item 3.5 (capítulo 03) especifica o conceito do PHM. As funções de um programa PHM, os benefícios e os desafios associados também são especificados na primeira fase da revisão da literatura. Embora os conceitos do PSS e do PHM sejam individualmente analisados na primeira fase da revisão é possível vislumbrar a necessidade da interação PSS-PHM ao avaliar os respectivos benefícios e desafios associados.

A segunda fase da revisão da literatura trata de uma investigação mais específica focada na interação PSS-PHM. Esta fase da revisão apresenta inicialmente o conceito da interação PSS-PHM e as evidências comerciais e acadêmicas de sua existência. Uma pesquisa sistemática nas principais base de dados (GoogleScholar, Scirus, Emerald, dentre outras) identifica a literatura mais relevante relacionada ao tema de pesquisa proposto. Utilizando o período de investigação de 12 anos (2000 e 2012) são encontrados apenas 14 trabalhos relevantes associados ao tema de pesquisa. Este resultado reforça a necessidade de se aprofundar o conhecimento sob o tema de pesquisa proposto.

A análise da literatura relevante descrita na tabela 3.1 (capítulo 03) permite responder as perguntas formuladas no item 1.1 (capítulo 01) na forma de fundamentos. Observa-se que os fundamentos são respostas preliminares e incompletas por não existir conhecimento suficiente sobre o tema de pesquisa proposto. Por este motivo, a análise dos fundamentos descrita no item 3.13 (capítulo 03) identifica as contribuições necessárias para estender o estado da arte sobre a interação PSS-PHM. Os resultados da análise dos fundamentos culminaram em um levantamento sistemático das oportunidades de pesquisa na forma de uma agenda.

4.1.2 - Etapa 2: Modelo para a interação PSS-PHM

A agenda de pesquisa definida na revisão da literatura específica, em particular, a necessidade de se desenvolver novos métodos e procedimentos para auxiliar a tomada de decisões operacionais em modelos de negócio PSS. Esta necessidade também se estende ao desenvolvimento de um ambiente computacional capaz de promover a interação PSS-PHM com base no paradigma de simulação online. Estas e as demais necessidades devidamente

justificadas e fundamentadas levam a proposição de um novo modelo para promover a interação PSS-PHM. Este modelo (proposto na forma de um *framework*) deve capturar as informações fornecidas por um programa PHM e utilizá-las em uma simulação. Os resultados da execução da simulação servem como base para verificar diversos *what-if* cenários definidos no plano operacional do PSS e assim auxiliar a tomada de decisões operacionais.

O *framework* para a interação PSS-PHM deve possuir um conjunto de módulos interconectados. Cada módulo deve possuir somente as funções pertinentes ao contexto em que o mesmo se aplica. Os dados gerados por um módulo devem ser capturados e utilizados como entradas para o módulo seguinte. As funções de cada módulo devem ser especificadas para que se possa proceder com a implementação do *framework* na etapa seguinte. O fluxo de dados e a forma como os módulos interagem entre si também devem ser especificados nesta etapa da metodologia. Detalhes específicos de interação também devem ser considerados.

4.1.3 - Etapa 3: Implementação do modelo

A terceira etapa da metodologia científica adotada trata da implementação do *framework*. O *framework* deve ser implementado como um ambiente computacional onde simulações podem ser desenvolvidas, configuradas e executadas. Utilizando a simulação desenvolvida, tanto o cliente quanto o fornecedor PSS podem executar a simulação e utilizar seus resultados para realizar tomada de decisões operacionais (monitorar a execução do PSS, avaliar impacto da mudança de requisitos sobre os KPIs, definir ações proativas para reagir a circunstâncias não previstas no projeto do PSS, etc.).

O primeiro passo para implementar o *framework* é selecionar a plataforma de desenvolvimento a ser utilizada. Utilizar uma plataforma de desenvolvimento já existente permite que as funções básicas presentes na plataforma sejam parcialmente ou completamente aproveitadas. Isto permite que o tempo utilizado para implementar o *framework* seja direcionado para desenvolver funções e novos componentes de simulação. Para selecionar a plataforma de desenvolvimento, um grupo de softwares deve ser selecionado e analisado através do confronto de características e limitações. Observa-se que esta análise deve essencialmente considerar as funcionalidades primordiais para implementar o *framework*.

Uma vez que a plataforma de desenvolvimento for selecionada, novos componentes de simulação serão desenvolvidos. Estes componentes encapsulam funcionalidades específicas do *framework* e as oferece para a simulação na forma de funções personalizadas. Cada componente de simulação desenvolvido deve possuir um conjunto de parâmetros para permitir uma configuração personalizada. Embora as simulações desenvolvidas com base no *framework* sejam executadas no modo online, elas podem receber componentes como um modelo de ativo padrão (SAM) para representar os ativos do modelo de negócio PSS que não assistidos por um programa PHM.

4.1.4 - Etapa 4: Estudos de caso

O *framework* proposto na segunda etapa da metodologia deve ser validado a partir de estudos de caso. Uma ou mais simulações serão desenvolvidas e configuradas conforme os requisitos do estudo de caso analisado (número de ativos, duração do contrato, etc.). As simulações devem ser desenvolvidas utilizando componentes básicos disponibilizados pela plataforma de desenvolvimento e os componentes desenvolvidos durante a implementação do *framework*. Está previsto a realização de cinco estudos de caso, sendo o primeiro dedicado a prova do conceito, o segundo a avaliação de demandas operacionais, o terceiro a análise e o suporte a tomada de decisões, o quarto a oferta de serviços de MRO e o quinto a oferta de serviços de gerenciamento de ferramentas.

O primeiro estudo de caso é destinado à prova do conceito. A prova do conceito consiste em verificar a capacidade da simulação em incorporar informações referentes ao desempenho dos ativos em seus resultados. O estudo de caso deve ser dividido em duas fases: 1- estimação da confiabilidade e 2 – simulações. A primeira fase tem por finalidade verificar a capacidade da simulação em estimar a confiabilidade dos ativos com base em dados reais fornecidos por um programa PHM. Por este motivo, somente uma simulação contendo apenas um modelo de ativo personalizado (CAM) será utilizada. Já a segunda fase tem por objetivo comparar os resultados obtidos com uma simulação contendo apenas CAMs e outra contendo somente SAMs. As simulações desenvolvidas serão executadas considerando variações no tempo de vida dos ativos.

O segundo estudo de caso analisa os efeitos que uma mudança de requisitos, solicitada durante a execução do PSS, causa nas metas de desempenho do modelo de negócio. Esta análise pode ajudar tanto o cliente quanto o fornecedor PSS a compreender as conseqüências destas mudanças. Uma vez que os efeitos das mudanças são conhecidos antecipadamente, ações podem ser tomadas para evitar o não cumprimento das metas estabelecidas. Neste estudo de caso todos os ativos são assistidos por um programa PHM e a mudança de requisitos é aplicada a partir do terceiro ano de execução do PSS. Já o terceiro estudo de caso verifica como um programa PHM pode assistir a tomada de decisões em um modelo de negócio PSS. Neste sentido, as informações fornecidas pelo programa PHM são diretamente utilizadas por um sistema automático de suporte a tomada de decisões (ADSM).

O quarto e o quinto estudos de caso tratam da oferta de serviços de MRO e de gerenciamento de ferramentas respectivamente. Todavia, para realizar estes estudos de caso, planeja-se utilizar dados reais obtidos das indústrias. Utilizar dados reais das indústrias permite realizar uma validação operacional nas simulações desenvolvidas. A validação operacional é uma das formas de garantir que os resultados de uma simulação possuem exatidão suficiente para representar os resultados obtidos de um sistema real sujeito a condições similares (Sargent, 2009). Pretende-se também desenvolver o quarto e o quinto estudos de caso utilizando os dados de duas indústrias e que elas pertençam, preferencialmente, a diferentes setores produtivos.

4.1.5 - Etapa 5: Análise dos resultados e conclusões

A última etapa da metodologia pretende analisar os resultados obtidos por este trabalho. A análise de resultados e conclusões deve fornecer, de maneira explícita, as principais contribuições provenientes deste trabalho. As contribuições devem ser classificadas conforme o critério estabelecido por Minger & Brocklesby (1997) em: 1 – metodológicas, 2 – técnicas e 3 – de ferramenta. Contribuição para metodologia consiste em um conjunto de atividades devidamente estruturadas para compreender o processo de desenvolvimento da pesquisa. Contribuição técnica descreve as atividades específicas realizadas no contexto da metodologia. Contribuição de ferramenta apresenta os artefatos desenvolvidos e utilizados para promover as contribuições técnicas. Uma vez que as contribuições foram sistematicamente apresentadas, o passo seguinte consiste na apresentação das limitações da pesquisa.

As limitações deste trabalho devem especificar as principais dificuldades e empecilhos encontrados para a realização do mesmo. As limitações encontradas podem ser de diversas naturezas (número de trabalhos sobre o tema proposto, ausência de informações técnicas, dados incompletos para a realização dos estudos de caso, etc.). Pretende-se também classificar as limitações de conteúdo e limitações do processo de pesquisa. Esta classificação permite distinguir os limites científicos deste trabalho dos percalços enfrentados para a realização do mesmo. Com base nas limitações apresentadas sugestões para trabalhos futuros devem ser descritos.

4.2 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta a metodologia científica adotada por este trabalho. A metodologia proposta consiste em um conjunto de etapas a serem seguidas e executadas. Uma descrição detalhada de cada uma das etapas especifica as atividades que serão executadas para desenvolver este trabalho. O próximo capítulo apresenta o *framework* desenvolvido para promover a interação PSS-PHM, assim como seus respectivos módulos e funcionalidades.

5 - FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM

Neste capítulo é apresentado um *framework* para a interação PSS-PHM. Desse modo, os principais conceitos, hipóteses e definições que fundamentem o *framework* são aqui discutidas. Os tópicos deste capítulo foram devidamente selecionados e organizados para fornecerem a base teórico/científica necessária para promover o *framework*. Os detalhes de implementação e validação do *framework* serão discutidos nos capítulos subsequentes.

5.1 - CONTEXTO TECNOLÓGICO DA INTERAÇÃO PSS-PHM

Muitos fornecedores de produtos de alta tecnologia (também conhecidos como produtos *high-tech*) têm modificado seus respectivos modelos de negócios para atenderem, de forma mais efetiva, seus clientes. Esta mudança de enfoque no negócio (isto é, venda de produto para venda integrada de produtos e serviços) tem se tornado ainda mais freqüente para ativos com alto valor agregado (como motores de aeronaves, máquinas CNC de alta precisão, trens, turbinas de vento, etc.). Isto porque, os clientes deste segmento de mercado têm procurado realizar seus negócios com fornecedores que absorvem as atividades de suporte (isto é, atividades de manutenção, reparo, etc.) para poderem se dedicar mais fortemente às atividades fins de seus negócios. Neste contexto, o OEM deve promover o gerenciamento otimizado do ciclo de vida dos ativos, já que este gerenciamento impacta diretamente no desempenho alcançado pelos clientes e, por conseguinte, na sustentabilidade do negócio.

O gerenciamento eficaz do ciclo de vida dos ativos requer o correto e exato dimensionamento das atividades de suporte. Atividades de suporte tipicamente incluem instalação, treinamento, serviços de manutenção e reparo, disponibilidade de peças para reparo, dentre outros (Goffim, 2000). Embora estas atividades contemplem serviços de manutenção, reparo e revisão (MRO), elas também influenciam diretamente na qualidade das inspeções, no estoques de peças para reparo, no sistema de informação, na alocação de recursos, dentre outros. Contudo, a provisão de serviços de MRO depende não somente do plano das atividades de serviço anteriormente definido, mas principalmente dos serviços que são requeridos ao longo do tempo de vida dos ativos (considerando até mesmo demandas não previstas). A figura 5.1 ilustra o contexto tecnológico em que a interação PSS-PHM está inserida.

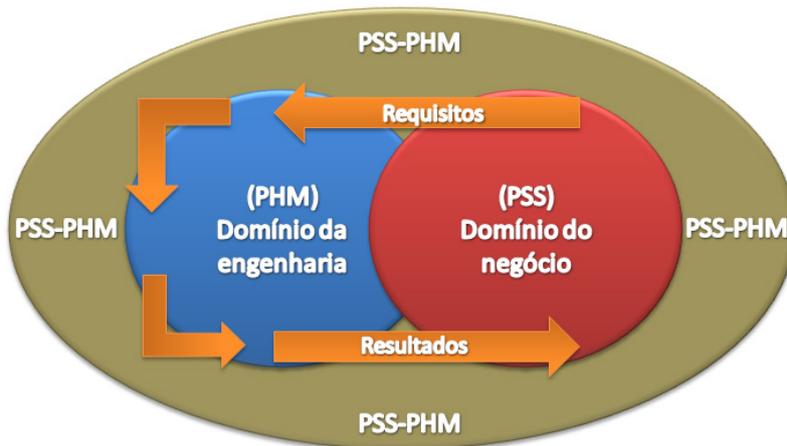


Figura 5.1: Contexto de integração PSS-PHM

No contexto da interação PSS-PHM, as demandas operacionais que surgem durante a execução do PSS devem estar em congruência com as metas estabelecidas no modelo de negócio. Demandas operacionais podem incluir, por exemplo, alterações no regime de manutenção empregado, no ciclo de trabalho dos ativos, na equipe de manutenção disponível, dentre outras. Uma vez que as demandas operacionais são especificadas, um ciclo de avaliação deve ser realizado. No ciclo de avaliação, as demandas operacionais estabelecidas são confrontadas com a capacidade de cumprimento das mesmas, considerando-se estado de saúde dos ativos e os índices de desempenho previamente definidos.

As metas estabelecidas no PSS são definidas com base nos níveis dos indicadores de desempenho estabelecidos. Em particular, disponibilidade e capacidade operacional estão entre os indicadores de desempenho mais empregados em contratos de serviços. Observa-se que ambos os indicadores oferecem uma clara visão de desempenho tanto para o fornecedor quando para o cliente, e são diretamente influenciados pela confiabilidade atual dos ativos. Para assegurar os níveis de confiabilidade almejados é necessário capturar informações sobre a utilização dos ativos e utilizá-las para prever comportamentos e possíveis condições de falhas (Ouertani *et al*, 2008).

Técnicas de modelagem e simulação são comumente empregadas para prever os efeitos de mudanças em sistemas já existentes (Banks *et al*, 2009). Utilizando uma simulação é possível analisar um conjunto de *what-if* cenários para prever os impactos que mudanças podem provocar sobre o desempenho dos sistemas. As técnicas de modelagem e simulação até então desenvolvidas estimam a confiabilidade dos ativos utilizando somente informações históricas e

distribuições de probabilidade. Embora esta abordagem seja adequada quando se deseja obter informações sobre a confiabilidade média, ela se torna imprecisa quando se deseja estimar a confiabilidade particular de cada ativo. A confiabilidade característica de um ativo é função do regime operacional, estado de saúde atual e das condições operacionais e ambientais ao qual o mesmo está sujeito (Hamada *et al*, 2008).

Por este motivo, técnicas tradicionais de modelagem e simulação têm se tornado ineficazes quando se deseja empregar, por exemplo, serviços de MRO mais otimizados. Isto porque, atividades de manutenção que não consideram modificações nas condições operacionais e ambientais podem levar os ativos a falhas e a interrupções não programadas (Markeset & Kumar, 2003). Neste sentido, o *framework* para a interação PSS-PHM constitui uma nova e inovadora abordagem capaz de guiar a decisões operacionais mais precisas. Isto porque, as simulações desenvolvidas com base no *framework* avaliam o desempenho dos ativos considerando os efeitos das mudanças operacionais e ambientais para gerar os resultados da simulação.

5.2 - FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM

O *framework* para a interação PSS-PHM é proposto com base na análise do fluxo de informações que deve ocorrer entre os processos e os sistemas envolvidos. Desse modo, cada módulo realiza uma análise particular sobre as informações recebidas e fornece o resultado da análise para o módulo subjacente. Os módulos do *framework* foram agrupados e conectados com base no conceito de malha fechada (Ogata, 2009). Desse modo, os dados de monitoramento condicional dos ativos são adquiridos e propagados (como um sinal de realimentação), com o objetivo final de fornecer suporte às decisões operacionais durante a execução do PSS. A figura 5.2 ilustra uma representação esquemática do *framework* proposto.

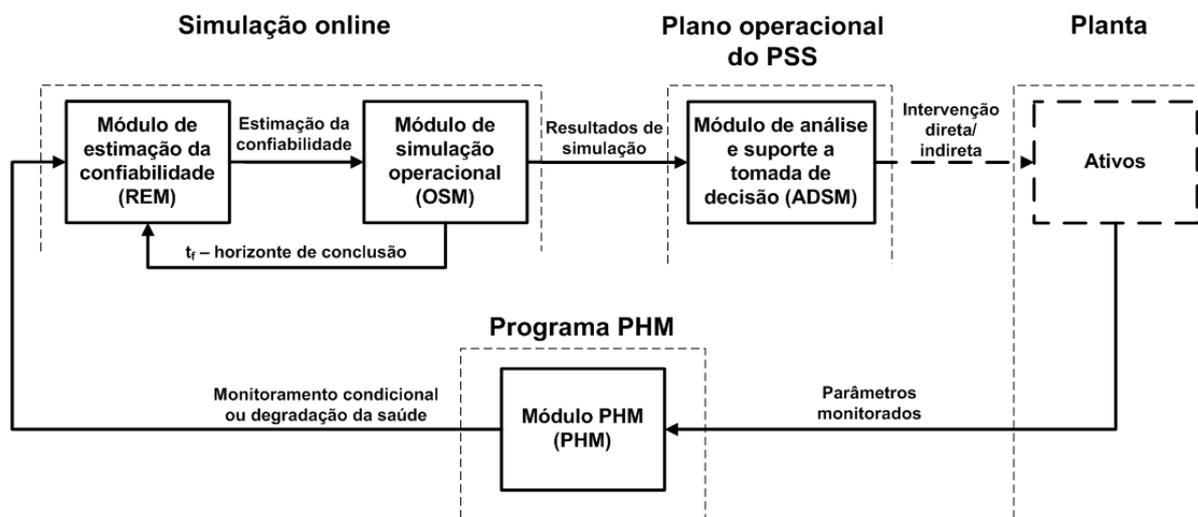


Figura 5.2: *Framework* para a interação PSS-PHM (Teixeira *et al*, 2012)

O *framework* é composto pelos seguintes módulos:

- Módulo de prognóstico e gerenciamento da saúde (PHM);
- Módulo de estimação da confiabilidade (REM);
- Módulo de simulação operacional (OSM);
- Módulo de análise e suporte a tomada de decisões (ADSM);

5.2.1 - Módulo de prognóstico e gerenciamento da saúde

Um programa PHM proporciona a previsão dos comportamentos futuros (baseados no estado atual do sistema) com o objetivo de manter um nível aceitável de degradação dos ativos (Vachtsevanos *et al*, 2006). Além disto, um programa PHM oferece uma forma inteligente de detectar e isolar a falha e, em alguns casos, estimar o RUL aumentando o nível de confiabilidade e segurança dos ativos (Shen *et al*, 2010). Para fornecer dados de degradação de desempenho, o módulo PHM deve implementar as funcionalidades suportadas por um programa PHM (como monitoramento condicional, diagnóstico de falhas, prognóstico de falhas, etc.). Funções de monitoramento condicional (CM) e de diagnóstico de falhas (FD) requerem uma comparação contínua entre o nível de degradação da saúde atual com os limites aceitáveis de operação. Além disso, a avaliação adicional feita pela função FD permite identificar possíveis falhas com base no estado de saúde atual conhecido. Utilizando as saídas do CM e FD, pode-se estimar o RUL do ativo.

Ainda que um módulo PHM possa implementar diversas funcionalidades com algoritmos e métodos específicos, uma explicação detalhada sobre cada função está fora do escopo deste trabalho. De fato, sob o ponto de vista do *framework*, um módulo PHM deve fornecer periodicamente dados de monitoramento condicional ou dados de eventos relacionados com a degradação de componentes críticos. Em outras palavras, ele deve continuamente monitorar as condições de desempenho dos componentes críticos e convertê-las em dados de degradação de desempenho. Níveis críticos de degradação podem ser fornecidos pelo módulo PHM ou diretamente configurados na simulação. Uma interface de comunicação dedicada também é necessária para promover o fluxo de dados entre um módulo PHM e um módulo de estimação da confiabilidade.

5.2.2 - Módulo de estimação da confiabilidade

O módulo de estimação da confiabilidade (REM) tem por finalidade estimar confiabilidade futura de um componente crítico com base nos dados de monitoramento atual. Este módulo determina a probabilidade de falha de um componente/sistema considerando uma “janela de tempo” pré-definida. Os dados de degradação da saúde são então medidos e convertidos em estimação da confiabilidade utilizando os limites que foram previamente definidos (Xu *et al*, 2009). Baseando-se nos dados de monitoramento condicional, nos limites operacionais e no horizonte de conclusão, o REM estima a confiabilidade esperada para o ativo. De fato, a confiabilidade de desempenho, também conhecida como confiabilidade da missão pode ser definida como a probabilidade condicional de um dado componente/sistema em executar suas funções de forma efetiva considerando a janela de tempo especificada e o nível de degradação atual (Lu *et al*, 2001). Toda vez que o estado de degradação (seja do componente crítico ou do sistema) é atualizado no *buffer* interno do REM, este estima a tendência de degradação e a variância do erro para k -passos-adiante. O número de passos-adiante está relacionado com o horizonte de conclusão especificado na simulação.

Horizonte de conclusão é uma regra específica que define quando o *simulation engine* deve interromper a execução da simulação (Wynn *et al*, 2009). Este horizonte pode ser configurado na simulação em função do número de trabalhos completados, do tempo absoluto de execução ou a partir da ocorrência de falha de um ativo. Ele também pode ser comprimido ou relaxado de acordo com a análise realizada. A confiabilidade condicional do ativo é então calculada com

base na estimação da degradação e nos limites operacionais. Caso a confiabilidade esteja abaixo do limite especificado, a representação do ativo na simulação entra em estado de falha. Predizer o tempo de vida remanescente dos ativos com base nas condições operacionais e ambientais observadas (ao invés de utilizar informações de MTBF), em geral, leva a uma maior exatidão de resultados (Tu *et al*, 2007).

A seleção da técnica para desenvolver o *kernel* do REM deve considerar restrições técnicas, poder computacional disponível, exatidão na estimação desejada, dentre outros. Além disso, devido à incerteza inerente e associada com a captura de dados dos ativos, a técnica selecionada para desenvolver o *kernel* deve pertencer ao grupo de técnicas de estimação estocásticas (como Filtros de Kalman (Lu *et al*, 2001), Filtro de partículas (Xu *et al*, 2009), Holt-Winter *smoothing* (Xu *et al*, 2009) (Lu *et al*, 2001a), etc.). Por exemplo, a técnica de Filtros de Kalman é considerada como sendo a solução mais apropriada para ativos cujo modo de falha seja linear (com representação matemática conhecida) e com erro de medição com distribuição normal. Por outro lado, quando o modo de falha é não linear com erro de medição não-gaussiano, Filtro de partículas é a técnica preferível. Holt's *exponential smoothing* pode ser aplicada para modos de falha dinâmicos e estocásticos com degradação contínua que podem ser representados a partir de séries temporais (Lu *et al*, 2007).

5.2.3 - Módulo de simulação operacional

O módulo de simulação operacional (OSM) consiste em uma simulação com ativos cobertos pelo PSS. Cada componente da simulação consiste em uma representação abstrata de um ativo (isto é, máquinas, gerente de serviços, técnico de manutenção, sistema de aquisição de dados, etc.) com atributos e comportamentos característicos. Os ativos assistidos por um programa PHM possuem ao menos um REM para que a falha possa ser estimada a partir dos dados reais coletados. Conseqüentemente, os resultados obtidos com o OSM tendem a ser mais confiáveis, já que são baseados em dados coletados diretamente dos ativos. Isto permite que o fornecedor PSS reaja, por exemplo, a circunstâncias não previstas durante o projeto do PSS.

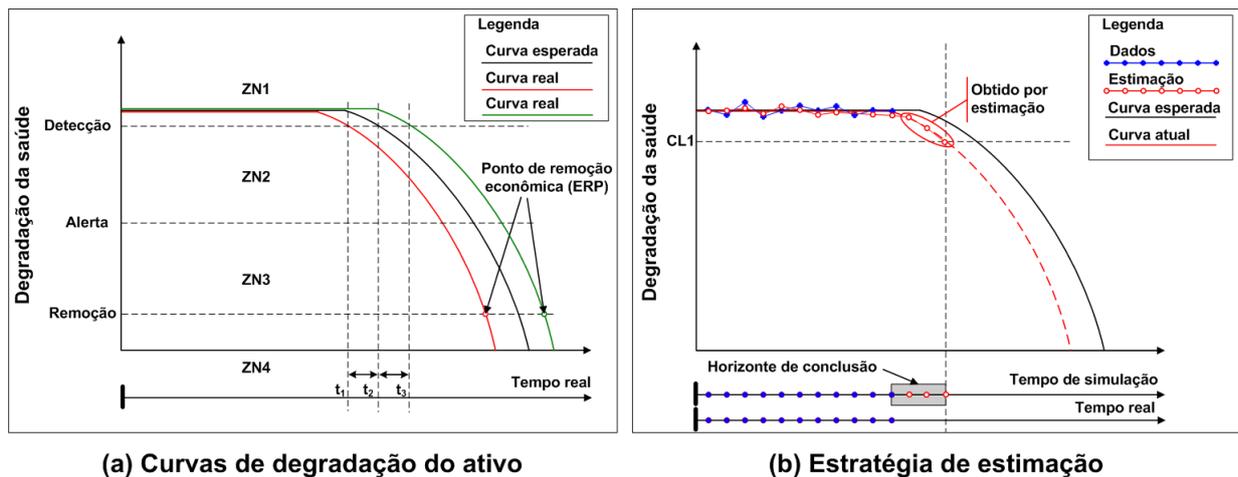


Figura 5.3: Estimação da confiabilidade (Teixeira *et al*, 2012)

A figura 5.3 (a) mostra a curva de degradação de saúde do ativo monitorado. A curva esperada é obtida a partir de dados históricos do OEM (distribuição de probabilidade e informação de MTBF) enquanto as curvas reais são obtidas com base nos dados de um programa PHM. O desvio entre a curva esperada e as curvas reais indica uma variação não esperada do tempo de vida do ativo (t_1, t_3 - tempo de falha atual, t_2 - tempo de falha esperado). Variações não esperadas são comumente causadas por influências externas ou possivelmente mudanças no regime de operação dos ativos. Quando o fornecedor PSS assume responsabilidade direta sobre o desempenho dos ativos, interrupções tardias ou interrupções precoces devem ser evitadas, já que podem levar a duras penalidades contratuais ou até mesmo a perda de rendimentos respectivamente.

Uma das principais funções suportadas pelo OSM é a função “estratégia de previsão”. Ao utilizar esta função, o fornecedor de serviços pode avaliar um regime particular de manutenção para cada ativo. Para desenvolver esta função, a curva de degradação de saúde de um componente/sistema é mapeada em quatro regiões distintas seguindo a abordagem sugerida por Hess (Hess, 2002). A primeira zona (ZN1) (figura 5.3 (a)) compreende o regime normal de operação do ativo com uma taxa de degradação constante. Em geral, enquanto o ativo estiver operando neste regime não é necessária nenhuma ação por parte da equipe de serviços. Quando a taxa de degradação começa a aumentar, a segunda zona (ZN2) é alcançada. A incerteza na estimatio da confiabilidade comumente inviabiliza ações de reparo do ativo neste estágio. Entretanto, algumas tarefas de cunho logístico (como aquisição de peças para reparo, alocação da equipe de manutenção, etc.) podem ser feitas de forma a contribuir consideravelmente com a redução do tempo de interrupção (*downtime*) do ativo. Quando a degradação da saúde atingir a

zona 3 (ZN3), haverá confiança suficiente na estimação da confiabilidade e a ação de manutenção e reparo pode então ser realizada. Caso o reparo não seja realizado até o ponto de remoção econômico (ERP), a degradação da saúde poderá atingir a zona 4 (ZN4) levando o ativo a um risco iminente de quebra.

A figura 5.3 (b) mostra a interação entre a função “estratégia de previsão” (FEP) e a execução da simulação operacional. A FEP habilita a simulação a realizar pequenas extensões do horizonte de conclusão utilizando uma “janela de tempo” adaptativa e limites de confiabilidade. Para cada estimação da confiabilidade futura do ativo, a FEP verifica se a confiabilidade obtida está dentro dos limites previamente estabelecidos. Uma vez que esta condição é alcançada, o horizonte de conclusão do OSM pode ser estendido habilitando uma extensão momentânea do tempo de simulação. Para cada novo passo-adiante, uma nova estimação da degradação do ativo é realizada até que o limite de confiabilidade inferior seja atingido. Para evitar demasiado aumento da incerteza sobre as estimações, uma função de confiança verifica a cada passo-adiante a variância da estimação. Caso a variância esteja acima da configurada, a execução da simulação deve ser interrompida e o usuário deve ser alertado sobre a possível perda de confiabilidade.

Outra função desenvolvida é a função modo de execução. Ao utilizar esta função, o *simulation engine (SE)* pode executar a simulação no modo contínuo ou no modo *one-step*. No modo contínuo, o SE retoma a execução da simulação a cada novo dado de monitoramento disponível. Isto significa que o usuário não necessita inicializar a simulação todas as vezes em que ela for interrompida. A desvantagem desse modo de execução é a impossibilidade de se realizar um *rollback*. No modo *one-step*, o SE executa a simulação até expirar o horizonte de conclusão. Uma vez que a simulação é interrompida, o usuário pode modificar os parâmetros da simulação para executá-la sobre outras condições de entrada. Para manter alinhado o estado da simulação com o estado dos ativos, o OSM não permite um *rollback* do tempo de simulação anterior ao tempo real registrado no sistema de aquisição de dados.

5.2.4 - Módulo de análise e suporte a tomada de decisões

O módulo de análise e suporte a tomada de decisão (ADSM) determina, com base nos resultados da simulação, quais ações proativas devem ser executadas. Este módulo encapsula um conjunto

de funções de tomada de decisão que avaliam as alternativas disponíveis considerando os indicadores de desempenho alcançados. Em geral, o processo de decisão no ADSM é sensível ao contexto em que o mesmo está inserido, sendo utilizados critérios com múltiplos objetivos ou apenas com um único objetivo para se encontrar uma solução sub-ótima ou, na melhor das hipóteses, uma solução ótima. De fato, funções de suporte a decisão devem considerar uma geração sistemática de alternativas para que a decisão mais efetiva e eficiente seja tomada ainda que em situações complexas (Yam *et al*, 2001).

Devido as peculiaridades do processo decisório, tomadas de decisões sob o contexto da integração PSS-PHM podem ser realizadas manualmente (pela equipe de engenharia) ou automaticamente por funções de suporte a decisão configuradas no ADSM. Quando o método de decisão automático é selecionado e múltiplos objetivos devem ser atendidos (por exemplo, minimizar o custo operacional, maximizar a disponibilidade e a capacidade dos ativos, etc.), a pesquisa por uma solução se torna difícil e somente pode ser resolvida utilizando técnicas de otimização (como métodos Newtonianos, algoritmos genéticos, *simulated annealing*, etc.). Além disso, quando os objetivos são potencialmente conflitantes, a seleção de um critério que melhor satisfaça a tomada de decisão requer a elucidação de diversas premissas do processo decisório, assim como a especificação de como estas premissas são aplicadas no processo de tomada de decisão (Iyer *et al*, 2006).

Com base nos resultados obtidos do ADSM ou da análise de engenharia, o fornecedor PSS sabe quais são as ações de intervenção direta ou indireta que devem ser executadas. Estas ações podem culminar em modificações das estratégias de manutenção, do plano de aquisição de peças para reparo, na alocação da equipe de serviços, dentre outros. Contudo, os resultados obtidos a partir da análise permitem realizar ajustes no modelo de negócio para evitar, por exemplo, o não cumprimento das metas estabelecidas, prejuízos com contratos futuros, ou até mesmo aumentar os rendimentos do fornecedor e do cliente.

5.3 - ANÁLISE DO FRAMEWORK PARA A INTERAÇÃO PSS-PHM

O *framework* proposto estabelece, de forma sistemática, como um programa PHM pode assistir um modelo de negócio PSS. Desse modo, utilizando o *framework* proposto é possível desenvolver simulações cuja representação dos ativos possa ser atualizada periodicamente com dados reais. Isto se torna particularmente útil quando é necessário avaliar a capacidade dos

ativos em atender as metas estabelecidas, ainda que esta capacidade seja diferente da que foi prevista durante a fase de modelagem do PSS. Utilizando a técnica de simulação online, o OEM pode avaliar, por exemplo, o impacto de modificações no plano operacional do PSS como forma de reagir a circunstâncias anteriormente não previstas. Isto se torna essencial para avaliar riscos envolvendo ativos com alto valor agregado, já que nestes casos, ao empregar um regime de manutenção errado os ativos estarão sujeitos a falhas catastróficas proporcionando risco ao meio ambiente ou até mesmo a vida humana.

Outro ponto a ser destacado é a aplicabilidade do *framework* desenvolvido. Métodos tradicionais de simulação são comumente empregados na fase de modelagem do PSS. Eles avaliam requisitos do PSS sob um vasto conjunto de premissas e possibilidades. Nas abordagens tradicionais, falhas nos ativos são modeladas somente com informações históricas e distribuições de probabilidade. Por outro lado, a técnica de simulação online possibilita uma análise mais detalhada e específica centrada nas condições operacionais de cada ativo. As falhas são estimadas com base em dados reais coletados. Isto permite realizar análises mais precisas de quando as ações operacionais e logísticas devem ser de fato executadas. O *framework* proposto foi desenvolvido com base no conceito de produtos informatizados (Zuboff, 1988), já que ele proporciona melhores indicadores de desempenho com base nos dados de monitoramento obtidos. Isto pode otimizar a execução de novos contratos de serviços ou até mesmo conduzir a possíveis extensões contratuais.

5.4 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta um novo *framework* para a interação PSS-PHM. Inicialmente são discutidos aspectos tecnológicos em que a interação PSS-PHM está inserida. Posteriormente, o *framework* e seus respectivos módulos são definidos. Os tópicos subsequentes descrevem as funcionalidades de cada módulo, o fluxo de informações entre eles e a forma como eles interagem entre si. Uma vez que o *framework* foi devidamente discutido e compreendido, o próximo capítulo é dedicado para apresenta os detalhes de implementação, assim como os componentes de simulação concebidos para desenvolver simulações.

6 - IMPLEMENTAÇÃO DO FRAMEWORK

Este capítulo descreve os detalhes de implementação do *framework* para a interação PSS-PHM. Inicialmente é apresentada uma visão geral de funcionamento do *framework* e como ocorre a interação entre os seus respectivos módulos. Posteriormente são comparadas diferentes plataformas de desenvolvimento a partir do confronto de suas características e particularidades. Em seguida são demonstrados os componentes de simulação desenvolvidos. O último tópico apresenta um fluxograma simplificado ilustrando como a simulação online deve funcionar.

6.1 - VISÃO GERAL DE FUNCIONAMENTO DO FRAMEWORK

O *framework* para a interação PSS-PHM estabelece uma arquitetura para desenvolver simulações online. Esta arquitetura é implementada na forma de um ambiente de simulação computacional onde as simulações podem ser desenvolvidas e executadas. Neste ambiente de simulação computacional, os dados capturados dos ativos são devidamente tratados e utilizados pela simulação como forma de alinhar o estado dos ativos representados com o estado dos ativos reais. A figura 6.1 mostra os detalhes de implementação e funcionamento do *framework* proposto.

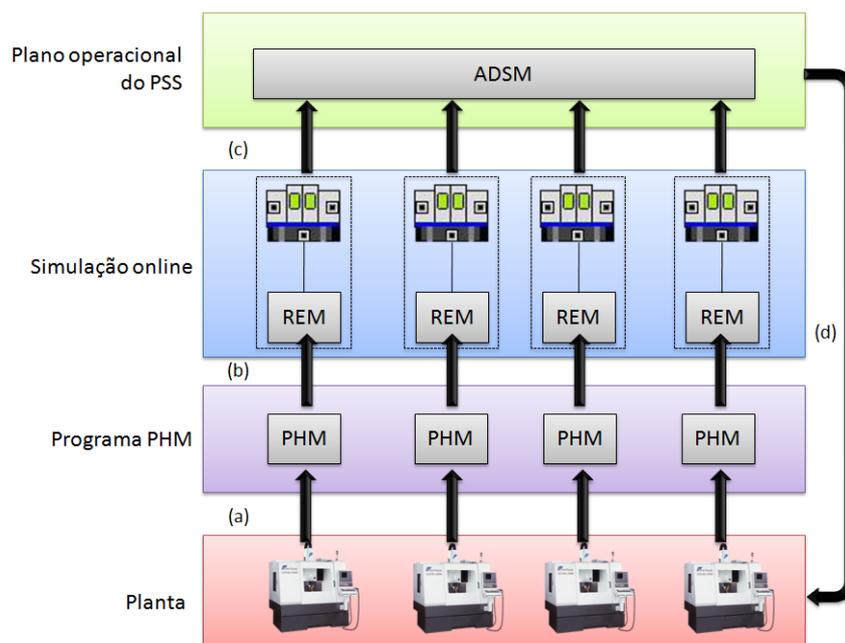


Figura 6.1: Visão geral de funcionamento do *framework*

Os dados monitorados dos ativos (figura 6.1 (a)) são capturados por seus respectivos módulos PHM. Cada módulo PHM possui um conjunto de funções de monitoramento, funções de diagnóstico e possivelmente de prognóstico estabelecendo uma relação entre os parâmetros monitorados e o estado de saúde do ativo. Em particular, as funções de diagnóstico e prognóstico são implementadas considerando as particularidades (como material, modo de degradação, limites críticos, etc.) de degradação de cada componente crítico. Os módulos PHM então fornecem dados de monitoramento condicional ou dados de eventos relacionados com a degradação dos ativos para a simulação online (figura 6.1(b)).

A simulação online possui um barramento de dados (PHM *databus*) onde transita todas as informações fornecidas por um programa PHM. Assim, a representação de ativos assistidas por este programa recebem dados dos ativos reais para atualizarem seus respectivos estados. Os dados monitorados são copiados para o *buffer* interno de cada ativo, sendo posteriormente utilizados pelo REM para estimar a confiabilidade do ativo representado. Isto torna a predição de falha do ativo representado na simulação mais fidedigna proporcionando um dimensionamento mais adequado dos serviços auxiliares e de suporte (manutenção, reparo, revisão, aquisição de peças para reparo, etc.). Uma vez que a execução da simulação é finalizada, os resultados obtidos são enviados para o plano operacional do PSS (figura 6.1(c)).

No plano operacional do PSS, as metas em curto prazo estabelecidas são confrontadas com a capacidade dos ativos em realizá-las. Este confronto se baseia em premissas e nos resultados de predição obtidos com a execução da simulação. A análise no plano operacional do PSS pode ser feita de forma manual (pela equipe de engenharia) ou de forma automática (por um ADSM). Ações de intervenção direta ou indireta (como modificar a quantidade de membros da equipe de serviços, adiantar ou atrasar a aquisição de peças para reparo, dentre outras) são definidas (figura 6.1(d)) para ajustar a execução das atividades de serviço e garantir o cumprimento das metas previamente estabelecidas no modelo de negócio PSS.

6.2 - SELEÇÃO DA PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO

A escolha da plataforma de desenvolvimento foi uma das primeiras atividades realizadas para se implementar o *framework*. Diferentemente de outras abordagens, em que se desenvolve uma nova plataforma de desenvolvimento, neste trabalho, optou-se por escolher uma já existente que pudesse apenas ser personalizada. Conseqüentemente, os componentes de simulação da

plataforma escolhida (por exemplo, o *simulation engine*) podem ser parcialmente ou completamente aproveitados sendo somente necessário incorporar funcionalidades de simulação online nos mesmos. Esta decisão foi particularmente importante, já que as funcionalidades tradicionais de software de simulação foram totalmente aproveitadas, o que permitiu reduzir o tempo de implementação de forma significativa e desenvolver os componentes específicos para o *framework*.

Existem diversas plataformas de desenvolvimento que podem ser utilizadas para a construção de modelos de simulação a eventos discretos. Algumas dessas plataformas são relativamente caras. Outras são mais genéricas e podem ser empregadas nas mais variadas aplicações. Cada software de simulação possui um conjunto de características, vantagens e desvantagens que o distingue, o que torna uma análise detalhada de cada plataforma inviável e fora do escopo deste trabalho. Desse modo, optou-se por avaliar as quatro plataformas de simulação mais utilizadas. Esta avaliação teve como base o confronto das funcionalidades, das capacidades e das principais características. Dentre as plataformas analisadas estão:

- WITNESS;
- Anylogic;
- Arena;
- Flexsim;

6.2.1 - WITNESS

WITNESS® é um software de simulação de processos, de propósito geral, desenvolvido pelo grupo LANNER. Esta ferramenta é reconhecida por ser de fácil utilização e por disponibilizar uma biblioteca rica em componentes. Possui uma linguagem própria para configurar as ações que os componentes devem executar em reação à ocorrência de eventos discretos (como a chegada de um elemento, uma quebra, etc.). Este software pode ser utilizado para desenvolver complexas simulações a partir do conceito de módulos. Um módulo no WITNESS é um componente que pode ser clonado, manipulado ou desenvolvido a partir de outro já existente.

Outra vantagem deste software é o mecanismo oferecido para gerar, de forma automática, relatórios e estatísticas com base nos resultados de simulação obtidos. Modelos virtuais em 3D da simulação também são facilmente criados. Isto proporciona ao usuário uma melhor visualização do ambiente simulado. A biblioteca de componentes 3D da plataforma pode ser estendida para utilizar formas e formatos conhecidos como, por exemplo, o VRML. Outra particularidade dessa ferramenta está relacionada com a capacidade de se integrar algoritmos de otimização na simulação. Estes algoritmos promovem uma avaliação mais completa sob diversos ângulos e premissas, no intuito de encontrar o cenário de simulação mais adequado dada as restrições impostas.

O WITNESS também suporta a importação de arquivos CAD e XML. Esta funcionalidade permite que *layouts* de plantas reais, desenvolvidas em sistemas CAD, possam ser utilizados na construção das simulações. Isto promove uma representação mais fidedigna do processo que está sendo modelado respeitando, por exemplo, restrições físicas e a disposição dos ativos. Esta ferramenta também pode ser integrada com outros aplicativos, planilhas eletrônicas (Excel) e banco de dados (como o Oracle, SQL Service, Access, etc.). Observa-se também que o WITNESS suporta o desenvolvimento de funções e aplicativos que podem ser utilizados para controlar a execução da simulação.

6.2.2 - Anylogic

Anylogic® é um software de simulação multi-modelagem desenvolvido pela empresa XJ Technologies baseado no paradigma UML-RT (Anylogic, 2011). Este software suporta o desenvolvimento de simulações utilizando diferentes métodos de modelagem (baseada em eventos discretos, sistemas dinâmicos e baseada em agentes). Os componentes fornecidos pela ferramenta (como *delays*, *conveyors*, etc.) são agrupados em bibliotecas de acordo com o método de modelagem. Os componentes possuem atributos e comportamentos que podem ser completamente configurados pelo usuário. Diferentemente das demais plataformas analisadas, a XJ Technologies optou disponibilizar a tecnologia Java para configurar a lógica de funcionamento dos componentes de simulação.

A interface gráfica e os objetos disponibilizados pelas bibliotecas permitem que o usuário desenvolva simulações para diferentes aplicações (manufatura, logística, modelagem de negócios, recursos humanos, dentre outros). As simulações desenvolvidas podem ser exportadas como *applets* ou como *stand-alone application*. Esta funcionalidade é particularmente útil, já que uma vez que a simulação é exportada, o usuário não necessita do Anylogic para executar a simulação. Outra importante funcionalidade é a capacidade de integração com softwares de controle de versão (CVS) e a possibilidade de importar arquivos CAD para a simulação. O Anylogic também disponibiliza elementos para se comunicar com banco de dados e planilhas eletrônicas.

Outra importante funcionalidade é proporcionada pela função *snapshot*. Com esta função é possível salvar o estado atual da simulação e carregá-lo posteriormente. A partir desta funcionalidade é possível implementar o modo *one-step* da função modo de execução. No Anylogic, novos componentes de simulação podem ser desenvolvidos utilizando os já existentes e demais funções da API Java. Funcionalidades completamente novas podem ser também desenvolvidas ou integradas às já existentes. Este software também oferece suporte à otimização, análise de sensibilidade e suporte a calibração da simulação.

6.2.3 - Arena

A plataforma Arena® é considerada como uma das pioneiras empregadas no desenvolvimento de simulações. Comercializado atualmente pela empresa Rockwell Automation, este software consiste em um ambiente integrado de desenvolvimento que auxilia equipes de engenharia, análise de negócios e empresas de consultoria a realizarem tomadas de decisões (Rockwell, 2012). No software Arena, os usuários podem desenvolver um *template* de componentes para uma biblioteca de objetos de modelagem aproveitando, em grande parte, a lógica de modelos já existentes.

O software Arena® também disponibiliza uma linguagem própria para a edição da simulação. O SIMAN é um método baseado em fluxograma para definir a lógica da simulação. O Arena também pode ser integrado com o OptQuest permitindo que os melhores cenários (relação entre entrada e saída) possam ser encontrados a partir de um processo de busca otimizada. Outra funcionalidade disponibilizada pela ferramenta é a capacidade de se conectar com base de dados

externas, assim como ler e escrever dados em planilhas eletrônicas. Funções personalizadas podem ser completamente desenvolvidas no Arena na forma de macros em VBA.

O software Arena também disponibiliza um conjunto de recurso para a geração automática de relatórios com o Cristal Report para o Microsoft Word. Utilizando o software de simulação é possível ajudar a demonstrar, prever e mensurar as estratégias para um desempenho otimizado. O Arena Visual Designer consiste em um módulo do software para desenvolver gráficos avançados e animações em 3D. Isto possibilita ao usuário uma melhor visualização do ambiente simulado. Arquivos CAD e desenhos desenvolvidos no Microsoft Visio também podem ser importados para o Arena.

6.2.4 - Flexsim

Flexim® é um software de modelagem e simulação de propósito geral desenvolvido pela empresa Flexim Software Products Inc. Este software possibilita o desenvolvimento de modelos de simulação a eventos discretos ou modelos de sistemas dinâmicos de fluxo contínuo. De acordo com a empresa Flexim (Flexim, 2012), o software de simulação Flexim pode ser utilizado para a modelagem, visualização e otimização dos mais variados processos (manufatura, cadeia de suprimentos, sistemas hospitalares, fluxo de trabalho em escritórios, etc.) promovendo tomadas de decisões mais conscientes e concisas com os objetivos estabelecidos pelos clientes.

No Flexim, simulações desenvolvidas podem ser renderizadas permitindo obter uma visualização tridimensional do ambiente simulado. Outra característica é a possibilidade de integrá-lo com o OptQuest possibilitando identificar cenários mais otimizados de acordo com as funções objetivo estabelecidas pelo usuário. A simulação pode ler e escrever dados em planilhas do Excel, assim como se conectar a uma base de dados (como Access, Oracle, DB2, MS SQL Server, dentre outros), já que o Flexim suporta a tecnologia ODBC (*Open Database Connectivity*). O software também possibilita ao usuário importar arquivos CAD para que a simulação seja definida mais rapidamente.

No rol de funcionalidades disponibilizadas pelo Flexim também está incluída uma interface para desenvolvimento de novos comandos e macros. Também é possível desenvolver novos componentes de simulação com base nos já existentes ou totalmente novos, utilizando a linguagem C++. O *simulation engine* do Flexim é totalmente baseado no Visual C++ e no .Net *framework* proporcionando novas oportunidades de integração. Caso seja necessário, o código fonte de funções personalizadas pode ser protegido utilizando o suporte para o encapsulamento por DLL's. Por último, este software também pode ser integrado com um sistema de controle de versão o que é particularmente útil quando múltiplos desenvolvedores trabalham simultaneamente no desenvolvimento da mesma simulação.

6.2.5 - Plataforma de desenvolvimento escolhida

Cada plataforma de desenvolvimento possui um conjunto de características, vantagens e desvantagens. Assim, uma análise minuciosa de cada plataforma exigiria um estudo bastante aprofundado, o que está fora do escopo deste trabalho. De fato, o estudo para a seleção aqui apresentado procura identificar somente as funcionalidades consideradas essenciais para implementar o *framework* proposto. A tabela 6.1 apresenta as principais características das plataformas de desenvolvimento analisadas.

Tabela 6.1: Principais características das plataformas analisadas

| Características das plataformas | Witness | Anylogic | Arena | Flexim |
|---|----------------|-----------------|--------------|---------------|
| Modelagem a eventos discretos | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Integra funções e lógica do modelo | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Suporte a multi-modelagem | - | ✓ | ✓ | ✓ |
| Conectividade com base de dados externa | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Suporta funções de otimização | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Visualização 3D da simulação | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Importa arquivos CAD | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Reutilização de módulos | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Salva e carrega o estado da simulação | - | ✓ | - | - |
| Execução remota da simulação | - | ✓ | - | - |
| Suporte a inserção de novas funções | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Em geral, todas as plataformas de desenvolvimento analisadas apresentam funcionalidades similares e oferecem suporte ao desenvolvimento de novas funcionalidades. Neste sentido, procurou-se selecionar a plataforma que ofereça o maior número de funções desejadas de forma nativa, isto é, não requer suporte adicional (do fabricante ou do distribuidor) para permitir o desenvolvimento de novas funções. As funcionalidades consideradas essenciais para implementar o *framework* são: suporte a execução remota da simulação, suporte a inserção de novas funções e suporte ao salvamento e restabelecimento da simulação.

Todas as plataformas de desenvolvimento analisadas apresentam suporte à modelagem a eventos discretos. Com exceção do WITNESS, as demais plataformas também oferecem suporte a multi-modelagem. Conectividade com base de dados externa, reutilização de módulos, otimização, visualização 3D e importação de arquivos CAD também são funções encontradas em todas as plataformas analisadas. Todavia, no que tange a execução remota da simulação, somente o software Anylogic oferece esta funcionalidade de forma nativa e independente da licença (estudantil, pesquisa, profissional ou avançada) adquirida. As demais plataformas impõem restrição quanto ao tipo de licença adquirida ou requerem suporte do fornecedor da plataforma para promover a execução da simulação sem a plataforma de desenvolvimento.

Outra importante característica analisada é o suporte para inserção de novas funcionalidades. Todos os softwares analisados também oferecem esta opção podendo novas funções serem implementadas nas linguagens VBA, C++, Java, dentre outras⁶. Três das quatro plataformas analisadas (neste caso WITNESS, Flexim e Arena) necessitam de suporte adicional ou disponibilizam esta funcionalidade somente para licenças específicas. Todavia, no software Anylogic, o suporte a incorporação de novas funcionalidades também é nativo e independente do tipo de licença adquirida. Ainda que o software Anylogic não disponibilize componentes complexos e de mais fácil utilização como encontrados as demais plataformas, pelas características apresentadas, ele pode ser considerado a plataforma de desenvolvimento mais adequada para implementar o *framework* proposto no capítulo 05.

⁶ Cada plataforma especifica a linguagem de programação para o desenvolvimento de novas funcionalidades.

6.3 - COMPONENTES DE SIMULAÇÃO DESENVOLVIDOS

Nesta seção são apresentados os componentes adicionais de simulação desenvolvidos para implementar o *framework* proposto no capítulo 05. Utilizando estes componentes, o usuário pode então construir e executar de simulações online com base no *framework* de interação PSS-PHM proposto.

6.3.1 - Modelo padrão de ativo

A implantação de funções de diagnóstico e prognóstico de falha passa pelo desenvolvimento de um conjunto de capacidades que envolvem uma análise cultural e do domínio do negócio ao invés de um puro avanço tecnológico (Grubic *et al*, 2011). O emprego destas funções se torna particularmente útil quando interrupções não-programadas podem levar os ativos a falhas catastróficas causando danos ao meio ambiente e possíveis riscos a vida humana (Tu *et al*, 2007). Desse modo, em um típico ambiente de negócio, ativos assistidos por um programa PHM terão que, invariavelmente, interagir com outros não assistidos. Por este motivo, um modelo padrão de ativo (SAM) foi desenvolvido para representar ativos cujas interrupções são estimadas por distribuições de probabilidade e informações de MTBF.

O modelo padrão de ativo não é atualizado com dados do ativo real. Além disso, ele não possui um módulo PHM ou um REM associado. Em um SAM, o tempo de interrupção (*downtime*) e o tempo para reparo são completamente descritos por funções determinísticas ou estocásticas. Um tempo determinístico para falha ou para o reparo se torna apropriado quando um regime de manutenção preventiva é empregado, caso contrário, deve-se utilizar uma função estocástica (Banks *et al*, 2009). Tempo aleatório é tipicamente baseado em funções de distribuição de probabilidade e informações históricas fornecidas pelo OEM. As funções exponenciais e de Weibull são distribuições de probabilidade comumente empregadas para estimar o tempo para falha de um ativo. A figura 6.2 mostra o SAM implementado.

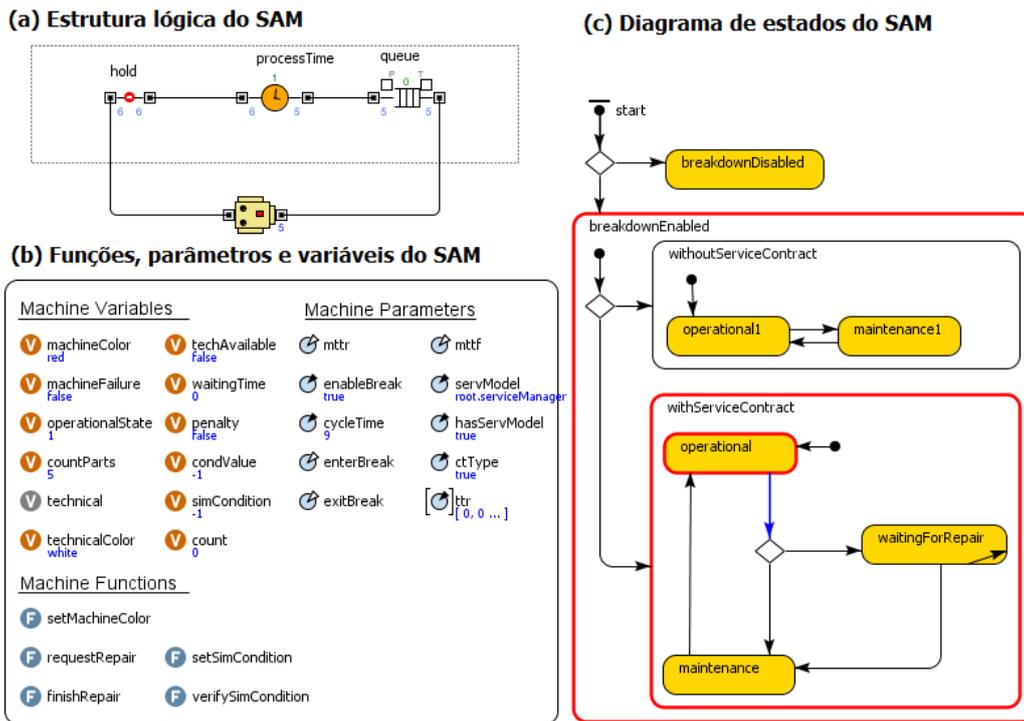


Figura 6.2: Modelo padrão de ativo (SAM)

A estrutura lógica do SAM (figura 6.2(a)) foi desenvolvida utilizando componentes disponibilizados pela Enterprise Library da plataforma de desenvolvimento Anylogic. Estes componentes foram devidamente conectados e configurados para representarem o comportamento de um “modelo padrão de ativo”. A estrutura lógica consiste basicamente de um elemento *hold*, *delay* e *queue* conectados em série. O primeiro componente bloqueia o recebimento de novas entidades quando a capacidade de processamento estiver superada. Já o segundo representa o tempo de processamento que o ativo leva para realizar uma determinada atividade. O último componente armazena a entidade que foi anteriormente processada. Este armazenamento se faz necessário já que a entidade está habilitada para deixar o SAM somente quando o componente posterior puder recebê-la.

As variáveis, funções e parâmetros são especificados na figura 6.2(b). Observa-se que todas as variáveis do modelo possuem escopo local ao passo que os parâmetros possuem escopo global. Isto significa que somente os parâmetros possuem visibilidade externa e podem ser acessados ou modificados durante a execução da simulação. Um diagrama de estados (figura 6.2(c)) especifica os possíveis estados (e suas respectivas transições) que o SAM estará sujeito. Um SAM pode ou não ser interrompido por uma falha. Caso a interrupção seja habilitada e o ativo não esteja contemplado no contrato de serviços, ele pode alcançar apenas os estados *operational*

e *maintenance*. Neste caso, assume-se que todos os recursos para executar a manutenção (peças para reparo, ferramentas, técnico, etc.) estão imediatamente disponíveis. Por outro lado, quando o ativo está sujeito a um contrato de serviços, o estado *waitingForRepair* é adicionado à lógica do modelo. Isto é necessário para contabilizar o tempo em que o ativo esteve inoperante aguardando a disponibilidade de recursos. Em modelo PSS, em que o fornecedor garante metas de disponibilidade ou confiabilidade, ele pode ser penalizado por este tempo de espera adicional.

6.3.2 - Modelo personalizado de ativo

O modelo personalizado de ativo (CAM) é uma representação abstrata do ativo assistido por um programa PHM. No CAM, o estado de falha é alcançado com base nos dados do ativo real e na estimativa da confiabilidade. A figura 6.3 ilustra o CAM desenvolvido e o seu respectivo diagrama de classes.

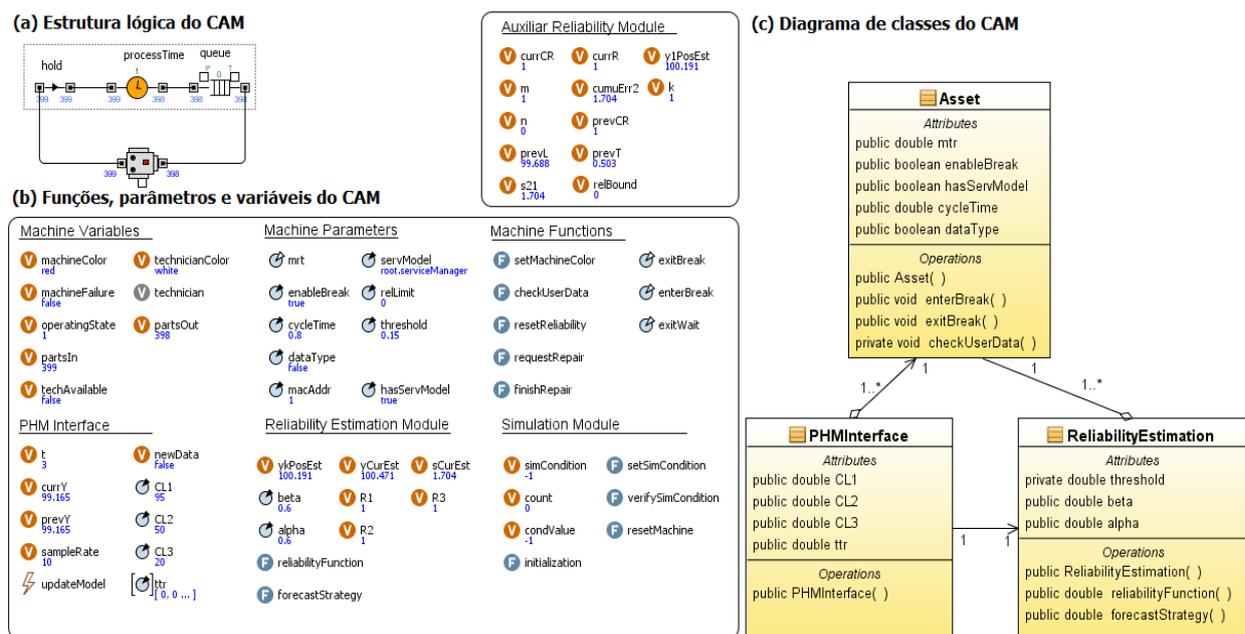


Figura 6.3: Modelo de ativo personalizado (CAM)

O CAM possui uma interface PHM e um REM. Cada conjunto (interface PHM e REM) está associado a um componente crítico do ativo. Um componente crítico é uma unidade mecânica ou elétrica discreta (por exemplo, um circuito integrado (Brown *et al*, 2007), um rolamento (Zhang *et al*, 2011), etc.) cuja falha pode afetar significativamente as funcionalidades do ativo. A interface PHM funciona como um *buffer* dedicado para armazenar os dados mais recentes de

degradação do ativo recebidos do sistema de aquisição de dados. Uma vez que a interface é atualizada com dados do ativo, o REM estima a confiabilidade condicional do componente crítico avaliado para o atual horizonte de conclusão da simulação. Parâmetros adicionais do REM são definidos durante a fase de desenvolvimento e configuração da simulação. No CAM, o ativo representado entra em modo de falha sempre que a confiabilidade condicional de um componente crítico alcançar o limite inferior especificado. Esta abordagem permite que o fornecedor PSS implemente diferentes políticas de manutenção (troca somente do componente que estiver em modo de falha ou também dos demais que estão em fase de degradação crítica).

Na figura 6.3 (c) também é apresentado o diagrama de classes do CAM. O diagrama de classes é tipicamente desenvolvido da fase inicial de projeto e fornece subsídios para a implementação do modelo (Genero *et al*, 2007). No diagrama de classes, uma classe Asset possui uma relação de agregação com as classes PHMInterface e ReliabilityEstimation com cardinalidade 1 para *. Isto significa que toda instância de uma classe Asset possui ao menos uma instância de suas respectivas classes agregadas. A relação de associação entre PHMInterface e ReliabilityEstimation denota uma troca de mensagens entre as classes. Embora não exista um número limite de componentes críticos declarados em um ativo, deve-se lembrar que a simulação é executada sob restrições computacionais e de memória.

Para implementar o *kernel* do REM, optou-se por utilizar a técnica de estimação estocástica Holt-Winter smoothing (também conhecida como *exponential smoothing*). Esta técnica foi escolhida já que de acordo com Gelper *et al* (2010), ela não necessita de um modelo paramétrico e ainda oferece resultados de estimação comparáveis a outras técnicas tradicionais como Filtros de Kalman e Filtros de Kalman Estendidos (LaViola, 2003). Como a degradação de componentes críticos considerados pelo *framework* é um processo de degradação contínuo com um modo de falha estocástico e dinâmico, o índice de sazonalidade da técnica Holt-Winter *smoothing* é desconsiderado. Portanto, a *exponential smoothing* de segunda ordem (também conhecida como *trend-exponential smoothing*) pode ser matematicamente definida a partir das equações 6.1 e 6.2 (Yar & Chatfield, 1990).

$$\theta_i = \gamma_1 h_i + (1 - \gamma_1)(\theta_{i-1} - \Omega_{i-1}) \quad (6.1)$$

$$\Omega_i = \gamma_2(\theta_i - \theta_{i-1}) + (1 - \gamma_2)\Omega_{i-1} \quad (6.2)$$

Em que:

- h_i = Dado de degradação da saúde no tempo i ;
- θ_i = Componente de nível da predição no tempo i ;
- Ω_i = Componente de tendência da predição no tempo i ;
- γ_1, γ_2 = Constante de suavização;

As equações 6.1 e 6.2 fornecem as componentes de nível e de tendência da predição. Em uma forma recursiva, a componente de tendência é calculada utilizando a componente de nível, sendo a componente de nível calculada a partir da última amostra de degradação da saúde adquirida. As constantes de suavização, utilizadas para ajustar a sensibilidade do estimador, podem ser escolhidas no intervalo (0,1] (NIST/SEMATECH, 2011). Uma vez que as componentes de tendência e de nível da predição são calculadas e o valor das constantes é selecionado, a estimação para k -passos-adiante pode ser obtida a partir da equação 6.3:

$$\hat{h}_{i+k|i} = \theta_i + k \cdot \Omega_i \quad (6.3)$$

Em que:

$\hat{h}_{i+k|i}$ = Predição para k -passos-adiante no instante de tempo i .

A equação 6.3 permite estimar a degradação do componente crítico monitorado para k -passos adiantes. Com o resultado da estimação e da respectiva variância do erro (equação 6.5) é possível calcular a confiabilidade condicional do componente crítico ou ativo monitorado. Para iniciar o estimador, os valores iniciais das componentes de nível e de tendência da predição podem ser obtidos a partir da equação 6.4:

$$\theta_2 = h_2 ; \quad \Omega_2 = h_2 - h_1 \quad (6.4)$$

A variância do erro de estimação para k -passos-adiante pode ser obtida, recursivamente, a partir da variância do erro de estimação para 1 -passo-adiante (Yar & Chatfield, 1990) (Lu *et al*, 2001). Desse modo, a variância do erro de estimação para k -passos-adiante é calculada a partir da equação 6.5:

$$\hat{v}_{i+k|i} = \left\{ 1 + \frac{1}{6}(k-1)\gamma_1^2 [1 + k\gamma_2 + k(2k-1)\gamma_2^2] \right\} v_1^2 \quad (6.5)$$

Sendo v_1^2 a média quadrada do erro de predição para l -passo-adiante, ela pode ser obtida a partir da equação 6.6 e 6.7:

$$\hat{v}_1^2 = \sum_{i=p+1}^{q-1} \frac{\mathcal{G}_{i+1}^2}{q-1-p} \quad (6.6)$$

$$\mathcal{G}_{i+1} = h_{i+1} - \hat{h}_{i+1} \quad (6.7)$$

Em que :

$\hat{v}_{i+k|i}$ = Variância do erro da predição para k -passos-adiante;

\hat{v}_1^2 = Variância do erro de estimação para l -passo-adiante;

\mathcal{G}_{i+1} = Erro de estimação para l -passo-adiante;

$p+1$ = Início da estimação.

$q-1$ = Fim da estimação;

Em geral, a estimação inicia em $p+1$ e finaliza em $q-1$ amostras do sinal coletado para garantir que o estimador seja devidamente inicializado e finalizado.

6.3.3 - Modelo do sistema de aquisição de dados

O modelo do sistema de aquisição de dados (DAM) representa um sistema de aquisição de dados na simulação. Este componente tem como responsabilidade capturar dados dos ativos, de forma síncrona, para atualizar o estado de seu *buffer* interno. O *buffer* interno é uma representação abstrata de um elemento “pai” (Hanisch *et al*, 2005), que armazena os estados mais recentes dos ativos. Este armazenamento intermediário é necessário para promover a atualização síncrona dos dados na simulação. Número de canais, taxa de amostragem e endereço do ativo são os principais parâmetros de entrada deste componente. A figura 6.4 mostra o modelo do sistema de aquisição de dados.

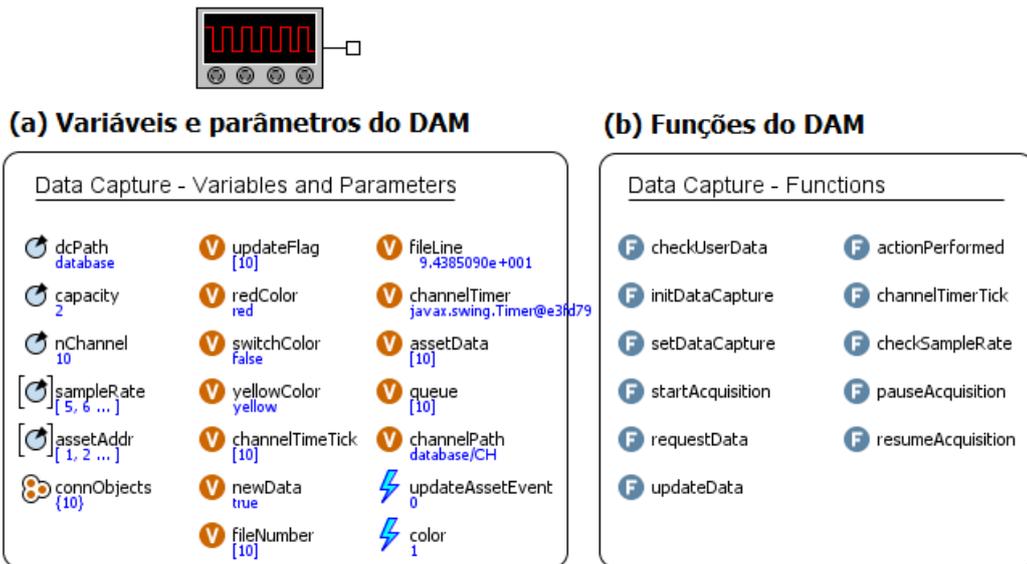


Figura 6.4: Modelo do sistema de aquisição de dados

O parâmetro *nChannel* especifica quantos canais podem ser utilizados para capturar dados dos ativos. Em geral, cada canal de aquisição está associado a um módulo PHM e possui uma taxa de amostragem e um endereço característico. O parâmetro *sampleRate* define a frequência em que o canal deve amostrar os dados dos ativos. Ainda que os canais de aquisição possuam diferentes taxas de amostragem, os dados dos ativos são atualizados na simulação somente após a conclusão do atual horizonte de conclusão. Esta medida é necessária para garantir um sincronismo e consistência para atualizar a simulação. O parâmetro *assetAddr* é um endereço virtual declarado para cada canal de aquisição. Este parâmetro especifica que ativo representado deve receber o dado de degradação de um canal de aquisição em particular.

6.3.4 - Modelo do provedor de serviços

O modelo do provedor de serviços (SPM) encapsula as atividades logísticas e operacionais envolvidas no contrato de serviços. Basicamente, o SPM representa a equipe (composta por um gerente de serviços (SM) e por um ou mais técnicos de serviços (TSM)) responsável pela execução das atividades de serviço. O gerente de serviços (SM) é projetado para gerenciar o trabalho dos técnicos de serviço disponíveis. Basicamente, o SM mantém um registro dinâmico dos técnicos disponíveis, assim como fornece um técnico quando solicitado. Este componente possui como atributos os parâmetros *nTechnician* e *availableTechnician*. O primeiro parâmetro

é um objeto da classe Java Collection e tem por finalidade armazenar referências das instâncias dos técnicos de serviço atualmente disponíveis. Já o segundo parâmetro é uma variável do tipo inteira utilizada somente para registrar o número de técnicos atualmente disponíveis.

Os comportamentos do SM são implementados a partir de três funções: *registryTechnician()*, *requestTechnician()* e *releaseTechnician()*. A primeira função é invocada pelo construtor do SM e tem por finalidade registrar a quantidade de técnicos disponíveis na simulação. Já a segunda função, isto é *requestTechnician()*, é invocada sempre que um técnico é necessário. Esta função verifica se existe ao menos um técnico disponível e retorna uma referência caso o mesmo esteja disponível. Esta ação também é acompanhada de um decremento do valor de *availableTechnician*. Caso não haja ao menos um técnico disponível a função retorna NULL e o ativo entra no estado *waitingForRepair*⁷. Uma vez que o técnico tenha finalizado a execução do serviço ao qual foi anteriormente alocado, a função *releaseTechnician()* é invocada e a variável *availableTechnician* é incrementada. A figura 6.5(a) ilustra o modelo do gerente de serviços.

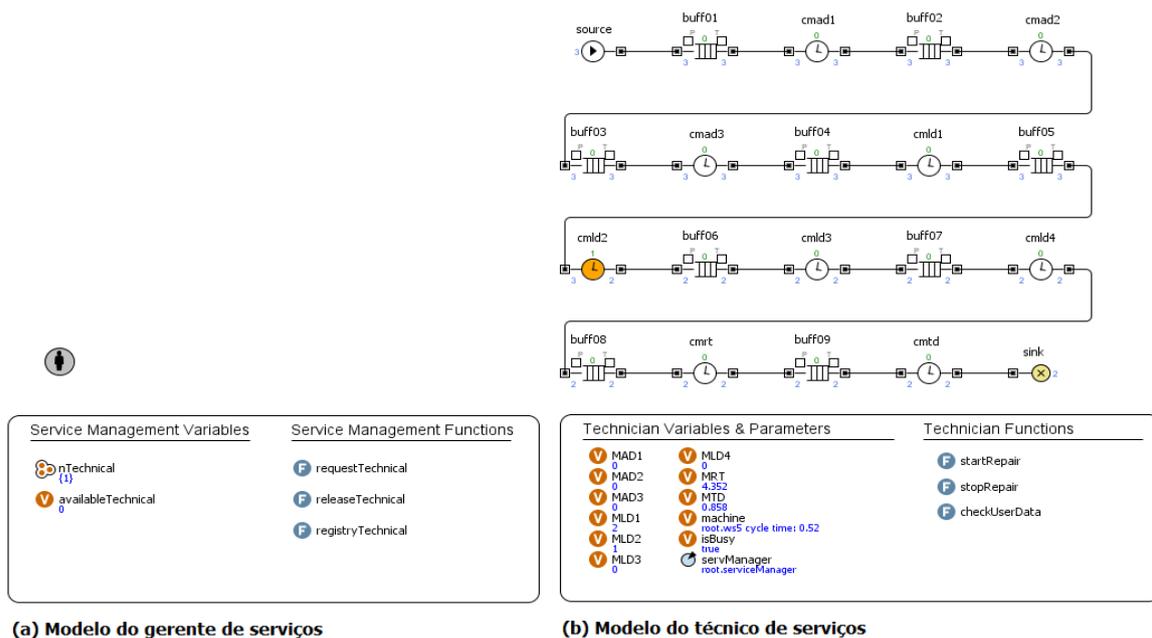


Figura 6.5: Modelo do provedor de serviços (SPM)

A figura 6.5(b) mostra o modelo do técnico de serviços (TSM). Este componente encapsula as atividades operacionais e logísticas estabelecidas em um contrato de serviços. Observa-se o TSM é projetado com base no modelo matemático proposto por Fleischer *et al* (2006). Desse

⁷ O ativo deixa o estado *waitingForRepair* e vai para o estado *maintenance* assim ao menos um técnico de serviço estiver disponível.

modo, as atividades de serviço a serem realizadas durante a interrupção do ativo são representadas por elementos *delay* com um tempo de ciclo característico. Observa-se também que o modelo implementado considera que as atividades de serviços são executadas em série e são não-preemptivas. O modelo matemático do técnico de serviços é descrito a partir da equação 6.8:

$$ODT = MAD_1 + MAD_2 + MAD_3 + MLD_1 + MLD_2 + MLD_3 + MLD_4 + MRT + MTD \quad (6.8)$$

Em que:

ODT = Tempo total de indisponibilidade do ativo;

MAD_1 = Tempo médio para notificar o serviço de campo;

MAD_2 = Tempo médio até a chegada do técnico;

MLD_1 = Tempo médio de espera por um técnico adicional;

MLD_2 = Tempo médio de espera pelo pessoal do cliente;

MLD_3 = Tempo médio de espera por peças de reparo;

MLD_4 = Tempo médio de espera por ferramenta de manutenção;

MRT = Tempo médio para reparo;

MDT = Tempo médio para reinício das atividades;

6.3.5 - Controlador de simulação online

O controlador de simulação online (OSE) é um componente desenvolvido para gerenciar a execução da simulação. Este componente tem como principal objetivo restringir o funcionamento do *simulation engine* da plataforma e encapsular funcionalidades de um *real-time engine*. Com esse componente é possível gerenciar a execução da simulação sem que haja perda de sincronismo entre as bases temporais (tempo real e tempo da simulação). Esta sincronização é necessária para evitar que um ativo personalizado seja atualizado com informações durante a execução de um horizonte de conclusão. A figura 6.6 ilustra detalhes de implementação do controlador de simulação online.

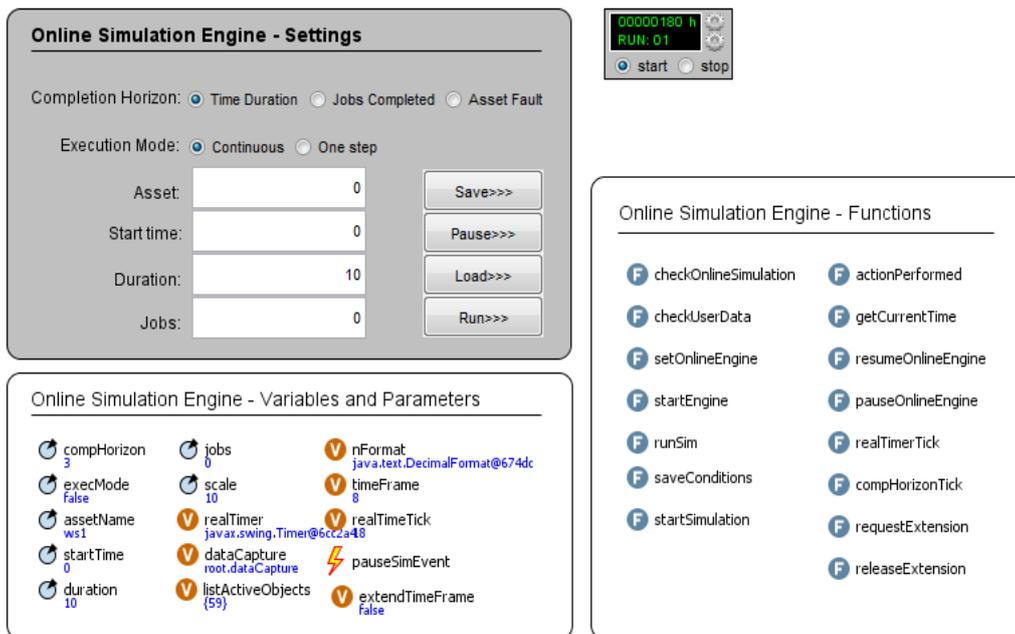


Figura 6.6: Modelo do controlador de simulação online

No OSE, alguns componentes estão sob o controle da plataforma de desenvolvimento enquanto que outros não. Isto garante a execução das funções em tempo real ainda que a execução da simulação esteja interrompida. O parâmetro *compHorizon* (horizonte de conclusão) pode ser configurado como *time duration*, *jobs completed* ou *asset fault*. Para o primeiro caso, o tempo de simulação (tempo virtual) é configurado com o mesmo valor especificado no parâmetro *duration*. Uma vez que o tempo disponível para execução é finalizado, o *simulation engine* da plataforma é interrompido até que seja habilitado pelo OSE para executar novamente. No segundo caso, o *simulation engine* entra no modo *sleep* assim que o número de entidades processadas for igual ao configurado no parâmetro *jobs*. No último caso, o *simulation engine* só é interrompido na ocorrência de falha de algum ativo.

6.4 - EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO ONLINE

Nesta seção são especificados os detalhes da execução de uma simulação online. Os principais eventos e transições da execução estão especificados no fluxograma descrito na figura 6.7.

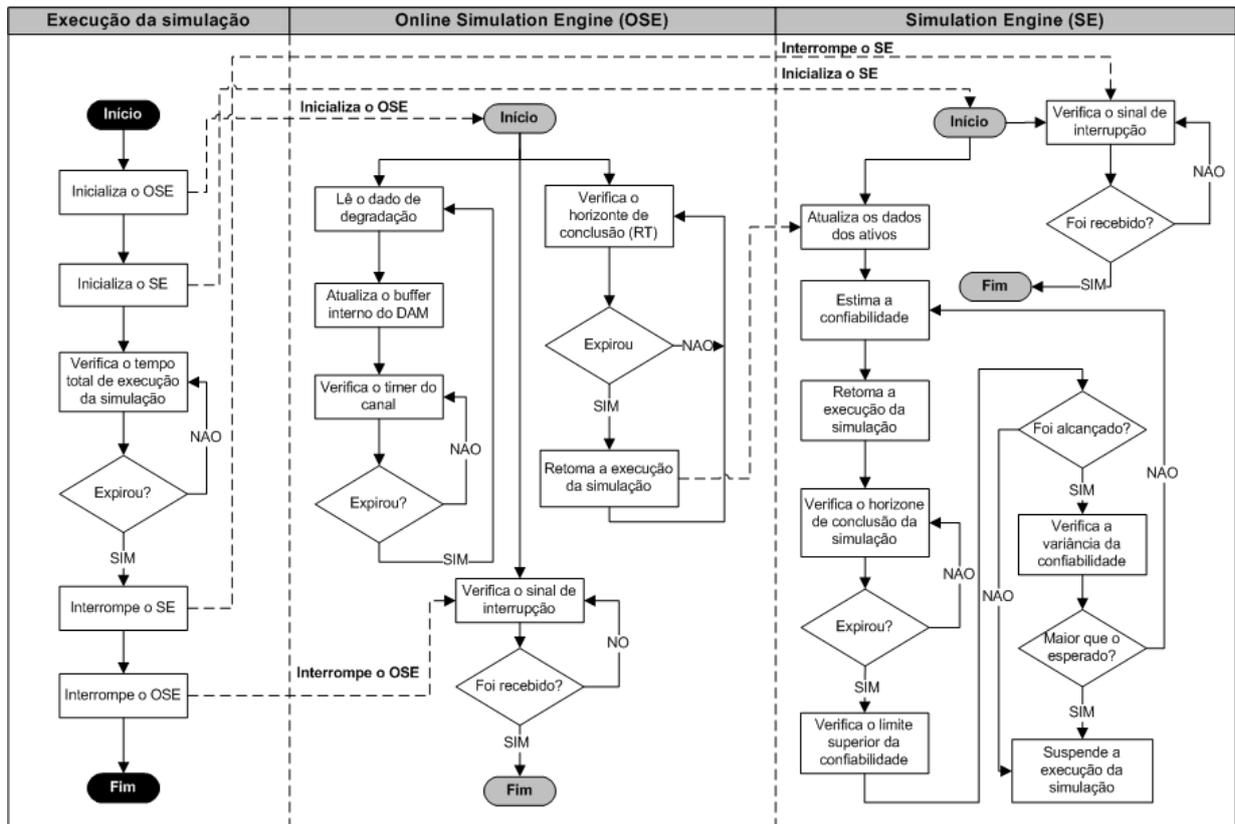


Figura 6.7: Fluxograma de execução de simulação online

Uma vez que a simulação é iniciada, os parâmetros de entrada da simulação são verificados para evitar inconsistência de dados durante a inicialização. Caso uma configuração inválida seja realizada (por exemplo, um número de canais negativos, um endereço de ativo inválido, etc.), uma *illegal argument exception* é disparada e a execução da simulação é interrompida. Com uma apropriada configuração de parâmetros, o controlador de simulação online (OSE) e o *simulation engine* (SE) são inicializados. O OSE possui uma base temporal em tempo real para gerenciar a atualização síncrona dos dados da simulação com os dados capturados dos ativos. Os dados são gravados no *buffer* interno do OSE e o horizonte de conclusão verificado. Uma vez que o horizonte de conclusão do OSE expira, os dados armazenados no *buffer* interno são enviados para o PHM *databus* para que os ativos representados na simulação possam ser atualizados.

O SE executa uma série de atividades independentemente do funcionamento do OSE. As atividades são executadas na seguinte seqüência: 1) atualização dos CAM; 2) realização da estimação da confiabilidade condicional; 3) retorno à execução da simulação e 4) verificação do horizonte de conclusão da simulação. A primeira atividade promove a atualização dos ativos personalizados representados na simulação. Os dados capturados e o endereço do ativo a que

estes dados se destinam são encapsulados em um *information message object* (IMO) e enviado para o PHM *databus*. Um filtro presente em cada CAM verifica se a mensagem recebida deve ser aceita ou rejeitada. Uma vez que a mensagem é aceita, a segunda e a terceira atividades são executadas. Caso o horizonte de conclusão atual da simulação expire, a execução da simulação é suspensa. Isto só não acontece se uma extensão do horizonte de conclusão for autorizada, em outras palavras, se a confiabilidade condicional de um ativo estiver dentro dos limites de confiabilidade especificados.

6.5 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os detalhes de implementação do *framework* para a interação PSS-PHM. Inicialmente foi demonstrado como a simulação online deve funcionar para promover a interação PSS-PHM. Posteriormente foi apresentado um estudo comparativo de quatro plataformas de desenvolvimento. O resultado deste estudo demonstrou que dentre as plataformas de desenvolvimento analisadas (WITNESS, Anylogic, Arena e Flexim), o Anylogic é a mais indicada para implementar o *framework*. Os componentes adicionais desenvolvidos para projetar simulações online foram, em seguida, apresentados. O último tópico descreve a execução da simulação online. O próximo capítulo apresenta os estudos de caso realizados para validar o *framework* proposto.

7 - ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo estão descritos os estudos de caso realizados para validar o *framework* para a interação PSS-PHM. Cinco estudos de caso foram desenvolvidos no intuito de investigar os benefícios desta interação, assim como para verificar o *framework* proposto. O primeiro estudo de caso trata especificamente da prova do conceito. Já o segundo analisa o impacto de demandas operacionais. O terceiro estudo analisa a assistência de um programa PHM para a tomada de decisões operacionais. Os dois últimos estudos são dedicados a validação do *framework* proposto utilizando dados reais coletados na indústria.

7.1 - CASO 1: PROVA DO CONCEITO

Este primeiro estudo de caso tem como principal objetivo realizar a prova de conceito (POC) do *framework* para a interação PSS-PHM. Para tanto, este estudo foi dividido em duas etapas: validação do módulo de estimação da confiabilidade (REM) e simulações. Na primeira etapa, verifica-se a capacidade do REM em estimar a tendência de degradação e a confiabilidade condicional de um componente crítico com base nos dados coletados. Já na segunda etapa, comparam-se os resultados obtidos com a execução de simulações, sendo a primeira uma simulação que executa no modo tradicional e a segunda no modo online.

7.1.1 - Módulo de estimação da confiabilidade

Esta primeira etapa da prova de conceito consiste em validar o módulo de estimação da confiabilidade (REM) presente nos ativos personalizados. Mais especificamente é verificada a capacidade da técnica estocástica escolhida (neste caso, a *trend exponential smoothing*) em estimar a tendência de degradação do componente crítico analisado. Devido a ausência de um módulo PHM que forneça informações sobre a degradação do ativo, os dados utilizados para a prova do conceito são dados reais capturados a partir do monitoramento de um componente crítico.

Os dados experimentais utilizados para validar o REM foram obtidos a partir do repositório disponibilizados pelo NASA Prognostic Data Repository (NASA, 2012a). Este repositório fornece dados de degradação de componentes críticos para validar técnicas experimentais de

diagnóstico e prognóstico de falha. Os dados utilizados neste experimento foram obtidos a partir do monitoramento da degradação de rolamentos instalados de uma bancada com um eixo acoplado a um motor. Maiores detalhes da realização do experimento de captura dos dados de degradação podem ser consultados em Qiu *et al* (2006).

Do conjunto de seis rolamentos monitorados, apenas os dados do quinto rolamento são utilizados. Um acelerômetro instalado sobre um mancal permite capturar o sinal de vibração do rolamento. Uma etapa posterior de processamento e filtragem é realizada para que os dados sejam utilizados na simulação. Durante a fase de processamento, o valor RMS do sinal de vibração foi obtido. Já durante a fase de filtragem, a frequência em que os dados foram coletados pela simulação foi reduzida para 1 hora. A figura 7.1 ilustra o sinal capturado por um acelerômetro e o seu respectivo valor RMS após a fase de processamento.

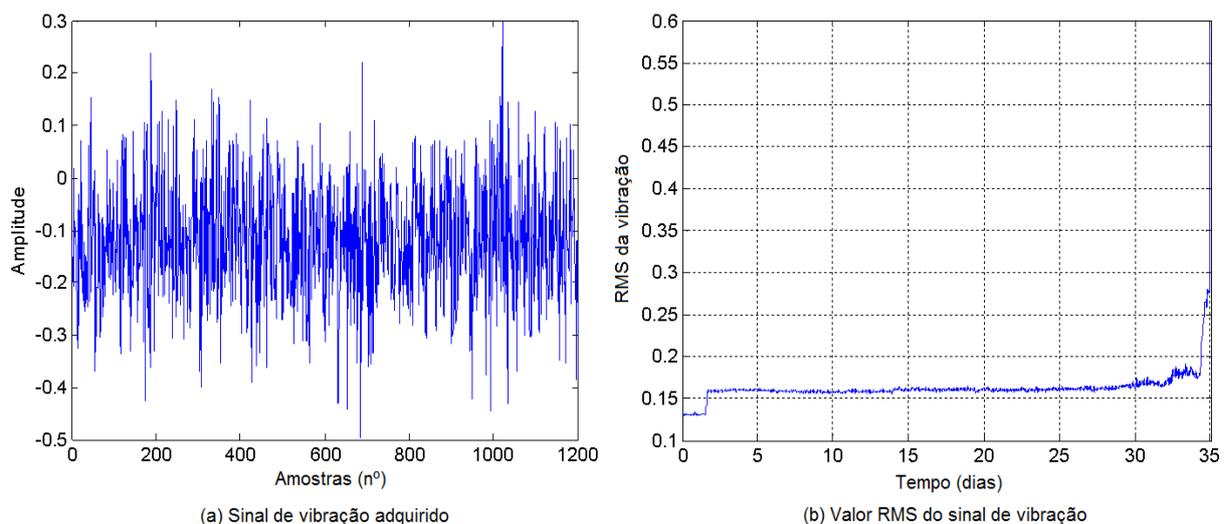


Figura 7.1: Dados de monitoramento condicional para validação do REM.

7.1.2 - Experimento

O experimento consiste em uma simulação com apenas um ativo personalizado. Para o ativo considerado apenas um componente crítico e um REM são declarados. A ação de reparo é desabilitada para que o experimento possa ser interrompido quando a primeira falha ocorrer. Desse modo, ao entrar em modo de falha é solicitado ao controlador de simulação online que interrompa a execução da simulação. Além disso, o tempo de vida esperado para o componente crítico é o mesmo disponibilizado pela base de dados (isto é, 840 horas). Como não está previsto

a realização de atividades de serviço, não foram inseridos na simulação um gerente e um técnico de serviços.

Em relação aos parâmetros do REM, a constante linear e a de tendência foram configuradas com os mesmos valores ($\gamma_1 = \gamma_2 = 0,6$). O primeiro limite crítico (CL1) foi especificado para o valor de 0,18. Já o segundo limite (CL2) e o terceiro (CL3) foram declarados respectivamente como os valores 0,27 e 0,31. Estes valores foram escolhidos a partir do nível de degradação do rolamento. A estimação para k -passos-adiante está vinculada ao segundo limite crítico (CL2). Em outras palavras, ao alcançar o segundo limite crítico (CL2), o horizonte de conclusão da simulação pode ser estendido já que existe confiabilidade suficiente nos dados de degradação. Obviamente, esta extensão estará sujeita a restrição de variância da estimação e do limite de confiabilidade inferior (0,15 referentes ao CL3). A tabela 7.1 apresenta os parâmetros de entrada da simulação.

Tabela 7.1: Parâmetros de entrada – estudo de caso 1

| Parâmetros de entrada para a simulação e componentes | |
|---|--------------|
| Parâmetros de simulação | Valor |
| Número de ativos analisados | 1 |
| Número de componentes críticos | 1 |
| Tempo de vida do componente crítico | 840h |
| Horizonte de conclusão | 1h |
| Duração do contrato | - |
| Módulo de estimação da confiabilidade | |
| Constantes do estimador (γ_1, γ_2) | [0,6; 0,6] |
| Primeiro limite crítico (CL1) | 0,18 |
| Segundo limite crítico (CL2) | 0,27 |
| Terceiro limite crítico (CL3) | 0,31 |
| Limite crítico escolhido | CL2 |
| Limite de confiabilidade | 0,15 |
| Máxima variância permitida | 0,01 |

7.1.3 - Análise dos resultados

A figura 7.2 e a tabela 7.2 mostram os resultados obtidos com a execução do experimento, De fato, observa-se que após receber a última amostra de dados do ativo, o algoritmo conseguiu estimar a tendência de degradação para 7-passos-adiantes. Para cada estimação realizada, o *kernel* do REM também calculou uma confiabilidade condicional associada. Para o 3-passo-

adiante, a confiabilidade e variância do erro de estimação foram de 99,9% e 1,73E-5 respectivamente. A redução gradativa da confiabilidade decorrente do processo de degradação do componente crítico pode ser verificada para as demais estimações. Por exemplo, para 5-passos-adiantes a confiabilidade e a variância obtidas foram respectivamente de 74,9% e 3,88E-5, enquanto que para 7-passos-adiantes foram de 8,7% e 7,02E-5 indicando que a confiabilidade obtida (8,7%) está abaixo do limite mínimo estabelecido (15%).

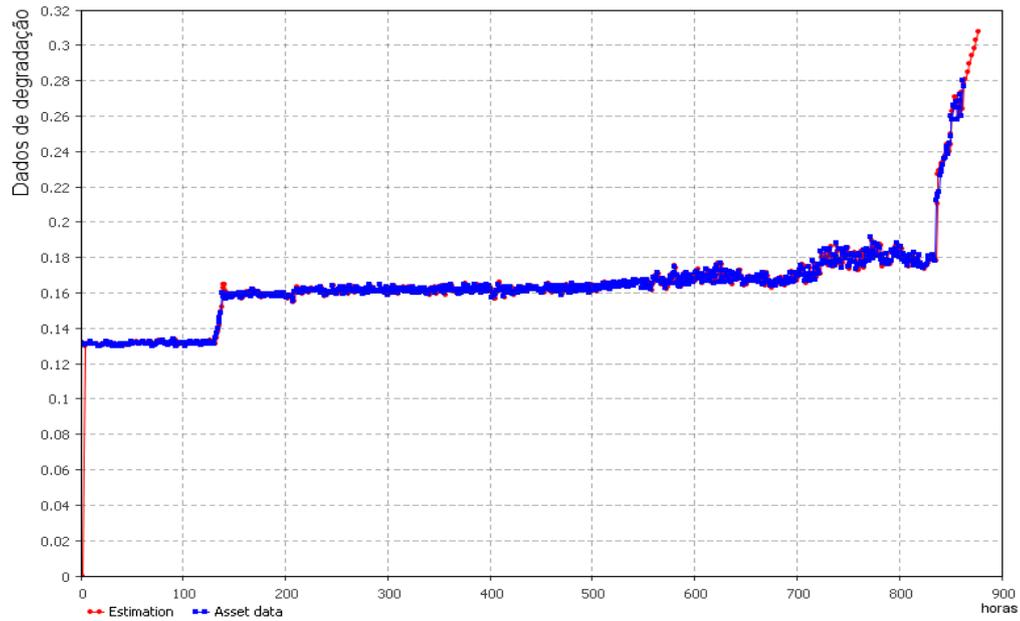


Figura 7.2: Curva de degradação do componente crítico

Tabela 7.2: Resultados do experimento - confiabilidade do ativo

| I | l | h_i | h_{i+l} | v_{i+l}^2 | R_c |
|------------|-----|--------|-----------|-------------|--------|
| 832 | 1 | 0,2804 | 0,2836 | 1,02E-05 | 1,0000 |
| 834 | 2 | - | 0,2898 | 1,03E-05 | 1,0000 |
| 835 | 3 | - | 0,2950 | 1,73E-05 | 0,9998 |
| 836 | 4 | - | 0,3002 | 2,68E-05 | 0,9709 |
| 837 | 5 | - | 0,3054 | 3,88E-05 | 0,7495 |
| 838 | 6 | - | 0,3105 | 5,32E-05 | 0,3528 |
| 839 | 7 | - | 0,3157 | 7,02E-05 | 0,0873 |

Os resultados apresentados ilustram a capacidade da técnica em estimar a tendência de degradação do componente crítico, bem como da confiabilidade condicional associada. Observa-se que a extensão do horizonte de conclusão foi realizada somente quando se obteve suficiente confiança de que o componente crítico estava em estado de degradação. Considerando a extensão da execução da simulação e do horizonte de conclusão configurado (1 hora), os resultados obtidos permitiram prever que o ativo entrará em modo de falha após 7 horas de utilização adicional. Em se tratando de decisões operacionais (em curto prazo), este período permite que o fornecedor PSS realize as ações necessárias para se evitar uma falha catastrófica, por exemplo.

7.1.4 - Simulações

Duas simulações foram desenvolvidas para se realizar a segunda fase deste estudo de caso. O primeira foi construída apenas com SAMs e também não possui um controlador de simulação online (OSE). Esta simulação representa o cenário típico adotado para se verificar a viabilidade do modelo de negócio. Já a segunda simulação possui um conjunto de ativos personalizados assistidos por um programa PHM. Ele também possui um controlador de simulação online (OSE) e uma representação de um sistema de aquisição de dados (DAM). As figuras 7.3 e 7.4 ilustram respectivamente a simulação somente com SAMs e a simulação somente com CAMs utilizadas neste estudo de caso.

Ambas as simulações foram configuradas com os mesmos parâmetros de entrada, incluindo o MTBF e o tempo de vida do ativo. Parâmetros adicionais da simulação online foram necessários apenas para configurar parâmetros internos do REM e nada interferem nos resultados dos experimentos. Observa-se que para se comparar os resultados obtidos em ambas as simulações foi estabelecida a hipótese de que o tempo de serviço de cada componente crítico é similar ao valor de MTBF. Embora se saiba que esta hipótese não se verifica na prática devido ao período de desgaste do componente crítico, ela já foi adotada em outra pesquisa conduzida por Greenough & Grubic (2011) para o mesmo propósito comparativo. De fato, o tempo de vida de um componente crítico se aproxima de seu valor de MBTF sempre que o período de desgaste do componente é desconsiderado na análise (Moubray, 1997).

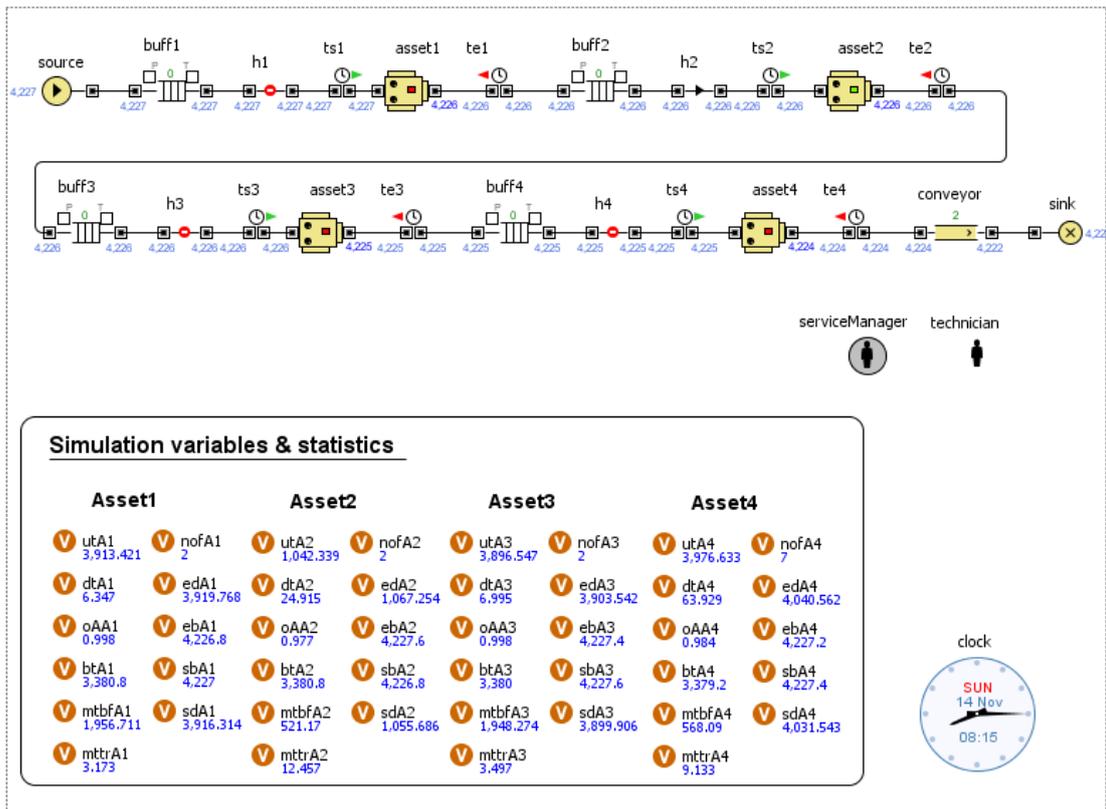


Figura 7.3: Simulação apenas com SAMs – estudo de caso 1

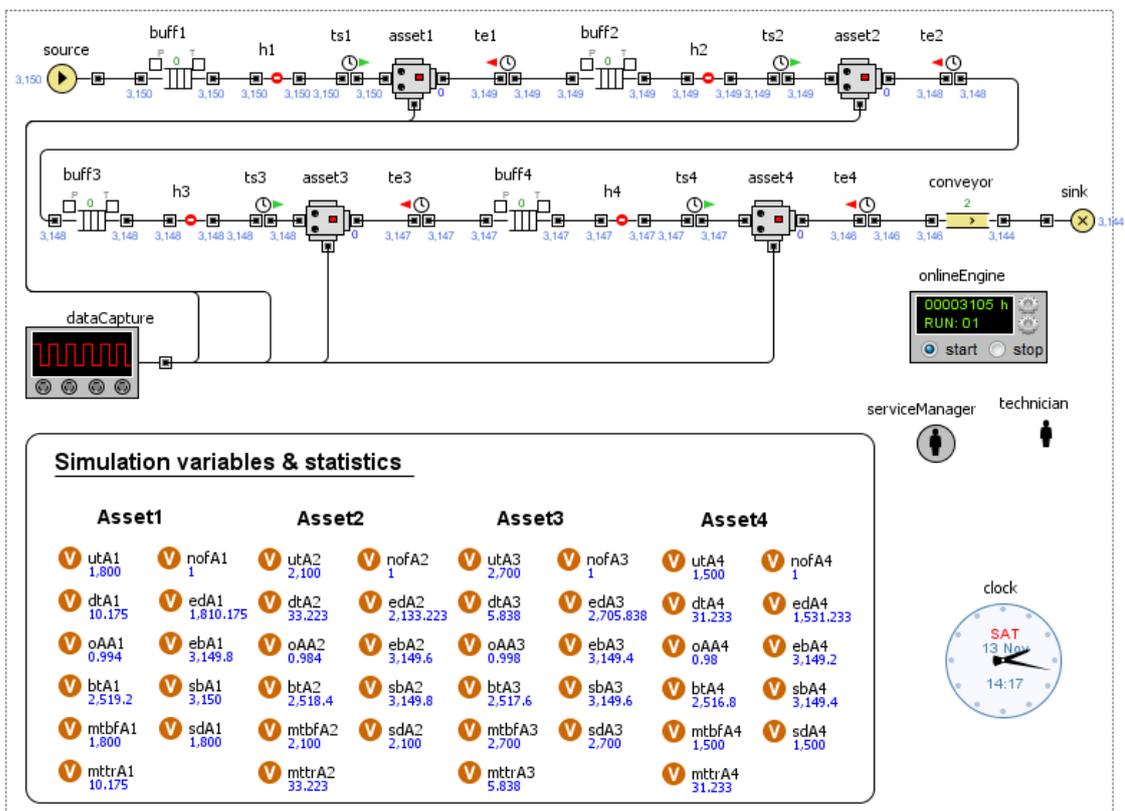


Figura 7.4: Simulação apenas com CAMs – estudo de caso 1

Tabela 7.3: Parâmetros de entrada das simulações

| Simulação tradicional | | | | |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | asset1 | asset2 | asset3 | asset4 |
| MTBF (h) = exponencial(x) | 1300 | 1800 | 2200 | 1000 |
| MTTR (h) = normal(μ,σ) | 3,0.3 | 14,1.4 | 4,0.4 | 9,0.9 |
| Resposta do OEM (h) = uniforme(x,y) | 48,72 | 48,72 | 48,72 | 48,72 |
| Duração do contrato (anos) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Simulação online | | | | |
| | asset1 | asset2 | asset3 | asset4 |
| Tempo de vida do ativo (h) | 1300 | 1800 | 2200 | 1000 |
| MTTR (h) = normal(μ,σ) | 3,0.3 | 14,1.4 | 4,0.4 | 9,0.9 |
| Constantes do REM | 0.6, 0.6 | 0.6, 0.6 | 0.6, 0.6 | 0.6, 0.6 |
| Limites de confiabilidade | 0.9,0.15 | 0.9,0.15 | 0.9,0.15 | 0.9,0.15 |
| Limites críticos (CL1,CL2,CL3) (%) | 95,85,60 | 95,85,60 | 95,85,60 | 95,85,60 |
| Horizonte de conclusão (h) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Resposta do OEM (h) = uniforme(x,y) | 1,24 | 1,24 | 1,24 | 1,24 |
| Duração do contrato (anos) | 15 | 15 | 15 | 15 |

7.1.5 - Experimentos

Três experimentos foram realizados nesse estudo de caso com o intuito de validar o *framework* para interação PSS-PHM, comparando os resultados obtidos em ambas as simulações. No primeiro experimento (Exp1), o contrato de serviço é executado sem qualquer modificação de requisitos. Além disso, considera-se que os ativos estejam operando sobre condições operacionais e ambientais ideais. Com estas hipóteses, o tempo de vida esperado para os ativos não pode ser afetado por influências externas estando sujeito somente a variações aleatórias. Embora estas hipóteses sejam raramente verificadas na prática, elas são válidas para fins de comparação dos resultados.

Já no segundo experimento (Exp2), considera-se que comportamentos dinâmicos afetam o tempo de vida dos ativos causando uma redução percentual em 20% da vida útil esperada. Esta é uma típica situação, em que condições ambientais (temperatura, umidade, etc.) ou operacionais (escalonamento do ativo para jornadas não previstas, etc.) modificam o tempo de vida esperado do ativo. No terceiro experimento (Exp3), circunstâncias não previstas também afetam o tempo de vida esperado para os ativos, porém neste caso, devido ao programa de manutenção empregado, o tempo de vida esperado do ativo aumenta em 20%. Esta informação é particularmente valiosa em um modelo de negócio PSS, já que o fornecedor PSS pode utilizá-la

para negociar, com o cliente, uma possível extensão do contrato de serviços visando um ganho adicional. As figuras 7.5 e 7.6 demonstram a disponibilidade operacional obtida para os ativos avaliados.

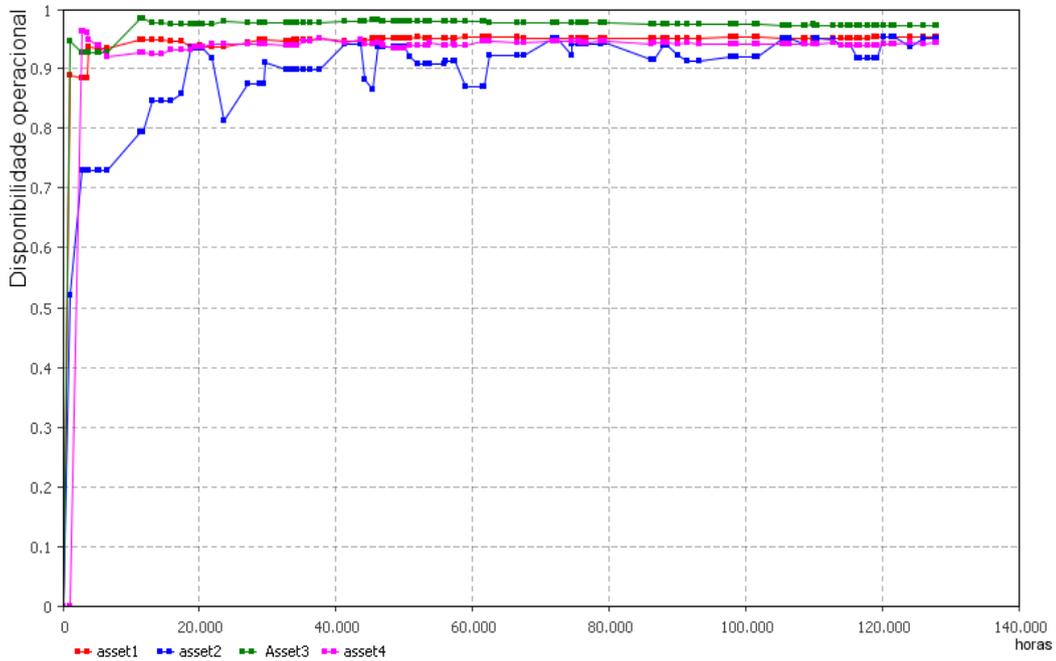


Figura 7.5: Disponibilidade operacional – simulação apenas com SAMs

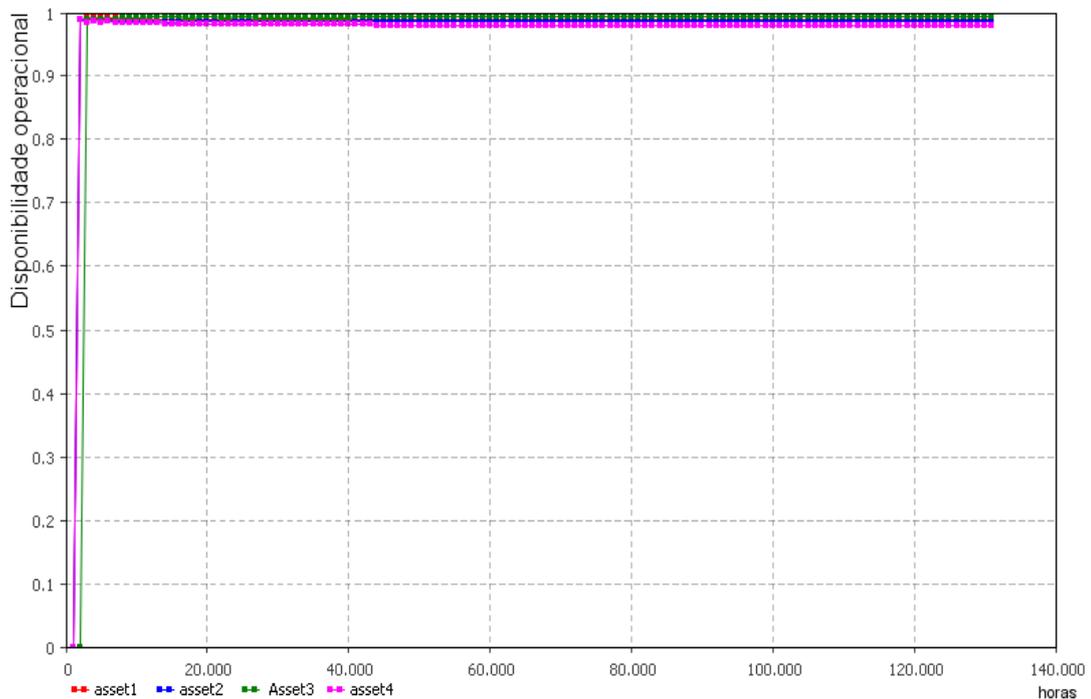


Figura 7.6: Disponibilidade operacional - simulação apenas com CAMs

Tabela 7.4: Resultados do experimentos – estudo de caso 1

| Resultados de simulação e índices de desempenho (simulação tradicional) | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | asset1 | | | asset2 | | | asset3 | | | asset4 | | |
| | Exp1 | Exp2 | Exp3 |
| Disponibilidade (%) | 95,3 | 95,4 | 94,8 | 94,9 | 95,2 | 94,2 | 97,3 | 97,1 | 97,2 | 94,4 | 93,8 | 93,0 |
| Peças produzidas | 131.349 | 131.394 | 131.389 | 131.349 | 131.394 | 131.389 | 131.349 | 131.394 | 131.389 | 131.349 | 131.394 | 131.389 |
| Utilização (%) | 93,7 | 93,4 | 93,9 | 95,3 | 94,5 | 95,3 | 95,3 | 96,0 | 97,2 | 96,7 | 95,0 | 94,1 |
| <i>Breakdowns</i> | 96 | 96 | 108 | 60 | 75 | 78 | 55 | 59 | 60 | 109 | 120 | 134 |
| MTBF (h) | 1.282,0 | 1.284,4 | 1.142,0 | 2.086,7 | 1.655,0 | 1.605,5 | 2.276,4 | 2.137,1 | 2.127,9 | 1.165,2 | 1.039,8 | 922,4 |
| MTTR (h) | 63,3 | 61,4 | 63,1 | 74,0 | 73,0 | 72,6 | 63,2 | 64,2 | 63,0 | 68,7 | 68,6 | 69,8 |
| Resultados de simulação e medidas de desempenho (simulação online) | | | | | | | | | | | | |
| | asset1 | | | Asset2 | | | asset3 | | | asset4 | | |
| | Exp1 | Exp2 | Exp3 |
| Disponibilidade (%) | 98,8 | 98,7 | 99,0 | 98,6 | 98,3 | 98,8 | 99,3 | 99,2 | 99,4 | 98,1 | 97,6 | 98,3 |
| Peças produzidas | 131.394 | 131.392 | 131.394 | 131.394 | 131.392 | 131.394 | 131.394 | 131.392 | 131.394 | 131.394 | 131.392 | 131.394 |
| Utilização (%) | 98,1 | 98,6 | 98,1 | 97,3 | 97,5 | 97,4 | 98,3 | 98,9 | 97,6 | 97,9 | 97,2 | 97,8 |
| <i>Breakdowns</i> | 91 | 114 | 80 | 69 | 84 | 57 | 55 | 69 | 46 | 121 | 143 | 101 |
| MTBF (h) | 1.417,0 | 1.136,4 | 1.611,6 | 1.852,1 | 1.525,2 | 2.246,2 | 2.347,4 | 1.883,0 | 2.787,8 | 1.063,6 | 893,2 | 1.272,2 |
| MTTR (h) | 15,2 | 15,0 | 15,6 | 25,6 | 26,9 | 26,9 | 16,6 | 15,8 | 16,3 | 20,8 | 21,7 | 22,0 |

7.1.6 - Análise dos resultados

No primeiro experimento (Exp1), o contrato de serviços foi executado inteiramente sem qualquer interferência externa ou de comportamento dinâmico associado. Neste caso, conforme descrito na tabela 7.4, resultados similares foram alcançados em ambas as simulações. De fato, uma pequena redução do número de interrupções (*breakdowns*), assim como uma melhoria na utilização e disponibilidade dos ativos foi observada para a simulação somente com CAMs. Ainda que essa diferença seja relativamente pequena (5 interrupções para o ativo 1), ela pode se tornar significativa quando o número de ativos aumenta.

Já no segundo experimento (Exp2), em que houve uma redução de 20% no tempo de vida esperado dos ativos, uma diferença considerável pode ser observada quando se compara o resultado de ambas as simulações. Como a simulação apenas com SAMs não é atualizada com dados de desempenho capturados dos ativos, ela não é capaz de reproduzir os efeitos da ocorrência de comportamentos dinâmicos em seus índices de desempenho. Por outro lado, os resultados da simulação apenas com CAMs mostram uma redução média de 18,3% (em média) do valor de MTBF e um aumento no número de interrupções (22,7% em média). Estes resultados indicam uma redução potencial nos ganhos em serviços e podem ser utilizados pelo fornecedor para encontrar a fonte de problemas, ou até mesmo requisitar modificações contratuais.

No terceiro experimento, circunstâncias não previstas também afetaram o tempo de vida esperado dos ativos, porém, devido ao programa de manutenção empregado, o tempo de vida esperado aumentou em 20%. Esta informação se torna valiosa para o fornecedor PSS, já que ela pode ser utilizada para se negociar uma extensão do contrato de serviços levando a um ganho adicional de rendimentos. Mais uma vez, com os resultados obtidos da simulação somente com SAMs não é possível o fornecedor PSS explorar esta oportunidade de negócio. Por outro lado, os resultados obtidos da simulação com CAMs sugerem um aumento no tempo de vida de todos os ativos (13,7%; 21,3%; 18,8% e 19,6% para o asset1, asset2, asset3 e asset4 respectivamente). Utilizando este resultado, o fornecedor PSS pode reduzir, por exemplo, o número de intervenções ou até mesmo dos técnicos disponíveis para a execução das atividades.

7.2 - CASO 2: DEMANDAS OPERACIONAIS

Este segundo estudo de caso tem por objetivo investigar como uma simulação online, baseado no *framework* para interação PSS-PHM, pode auxiliar o fornecedor PSS a avaliar o impacto da execução de “demandas operacionais”. Uma demanda operacional surge de uma necessidade em modificar requisitos de execução do contrato para atender um interesse particular, em geral, do cliente. Uma demanda operacional pode ser vista como um comportamento dinâmico cujos efeitos necessitam ser cuidadosamente analisados para evitar um impacto negativo sobre as metas estabelecidas na modelagem do negócio. De fato, o cumprimento de demandas individuais dos clientes leva a custos adicionais devido ao modelo de negócio empregado (Aurich *et al*, 2006).

Demandas operacionais podem ser diversas e, na maioria dos casos, estão associadas a particularidades de cada modelo de negócio. Por este motivo, uma análise detalhada de todas as demandas se torna difícil, sendo na verdade praticamente impossível de serem completamente previstas durante o projeto do PSS. A demanda operacional a ser analisada neste estudo de caso trata do aumento não previsto da capacidade de processamento dos ativos. Em outras palavras, em um dia de trabalho, os ativos serão mais utilizados do que se havia previsto na fase de modelagem do negócio. Esta situação ocorre quando o cliente necessita, por exemplo, acrescentar mais um turno de trabalho para atender uma demanda em particular. Esta nova demanda deve ser cuidadosamente analisada pelo fornecedor PSS, já que impacta diretamente no planejamento das atividades logísticas e operacionais.

7.2.1 - Simulação

A simulação online proposta para a execução deste estudo de caso é composta por 10 ativos periodicamente atualizados com dados de um programa PHM. A simulação também possui um sistema de aquisição de dados, assim como um controlador de simulações online. Cada canal de aquisição de dados foi configurado com uma taxa de amostragem característica. Desse modo, embora os dados dos ativos reais sejam capturados em diferentes taxas, a simulação será atualizada somente após a finalização de cada horizonte de conclusão. A figura 7.7 mostra a simulação online utilizado na realização deste estudo de caso.

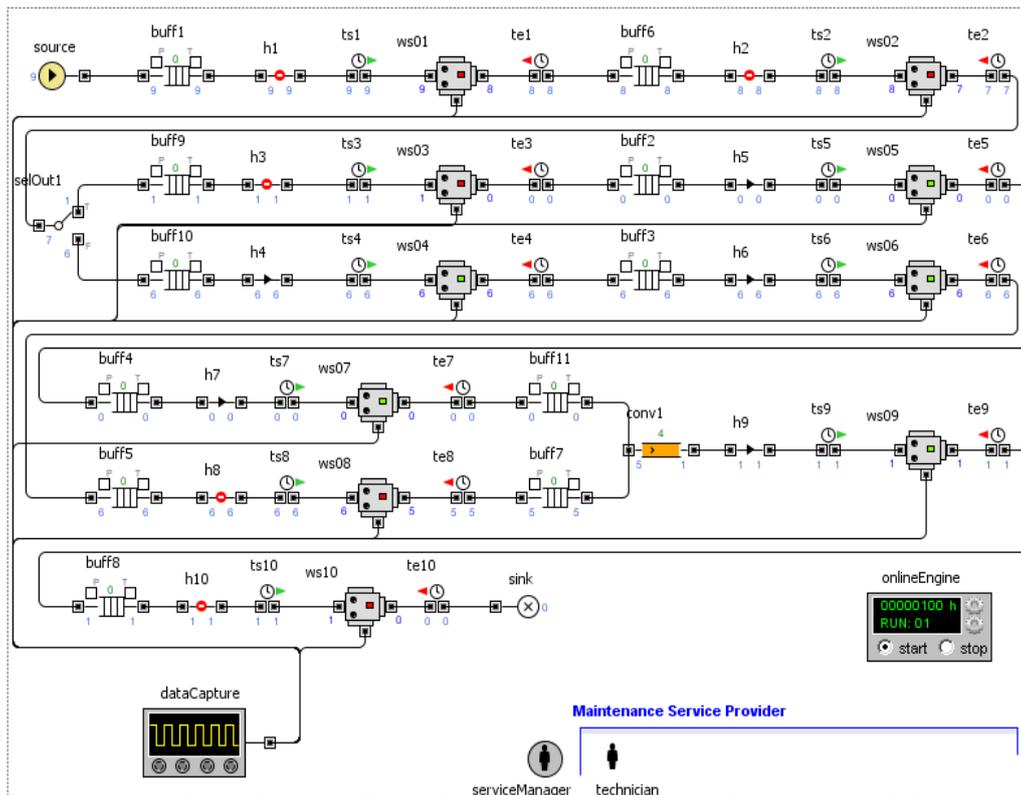


Figura 7.7: Simulação online – estudo de caso 2

A simulação online conta com um gerente e com um técnico de serviços, sendo este último encarregado de realizar as atividades de manutenção e reparo. Cada ativo possui um conjunto de atividades operacionais e logísticas consideradas. Parâmetros de entrada adicionais foram configurados para definir os parâmetros internos do REM (como constantes de estimação, limite crítico, limites de confiabilidade, etc.). Observa-se que estes parâmetros adicionais não afetam os índices de desempenho obtidos com a execução da simulação. A tabela 7.5 ilustra os parâmetros de entrada da simulação deste estudo de caso.

7.2.2 - Experimento

O experimento consiste em executar a simulação para todo o período de contrato estipulado (10 anos) ainda que sob a influência de mudança de requisitos operacionais. Desse modo, no primeiro período de execução (03 anos) os ativos são configurados com os tempos de ciclos e taxas de amostragem conforme especificado na tabela 7.5. Espera-se que os resultados obtidos sejam satisfatórios e comparáveis aos obtidos durante a fase de projeto do PSS, já que nesta primeira fase da execução do PSS, os ativos não estão sujeitos a efeitos de comportamentos

dinâmicos. Após o terceiro ano (ou 26.292 horas), um aumento da demanda de processamento (de 35%) é imposto. Este aumento é configurado como uma redução do tempo de ciclo dos ativos e de suas respectivas taxas de amostragem definidas no sistema de aquisição de dados. Em particular, a redução das taxas de aquisições é realizada para representar proporcionalmente a redução do tempo de vida esperado dos ativos, por dia de trabalho.

A tabela de parâmetros de entrada foi dividida em dois grupos. No primeiro grupo, especificam-se os parâmetros de entrada dos ativos e os da simulação. Já no segundo grupo da tabela apresenta os parâmetros de entrada para a execução das atividades de serviço. Observa-se que neste estudo de caso, as atividades logísticas e operacionais necessárias para promover a manutenção e reparo do ativo foram especificadas conforme definido por Fleischer *et al* (2006). Entretanto, algumas atividades específicas da simulação foram desconsideradas (como o tempo de notificação da falha, tempo para diagnóstico, dentre outras.) já que as informações oriundas de um programa PHM permitem que o fornecedor PSS as realize de forma antecipada e previsível. A figura 7.8 ilustra graficamente a disponibilidade operacional dos primeiros cinco ativos (ws01, ws02, ws03, ws04 e ws05), ao passo que a tabela 7.6 apresenta os resultados obtidos com a execução da simulação.

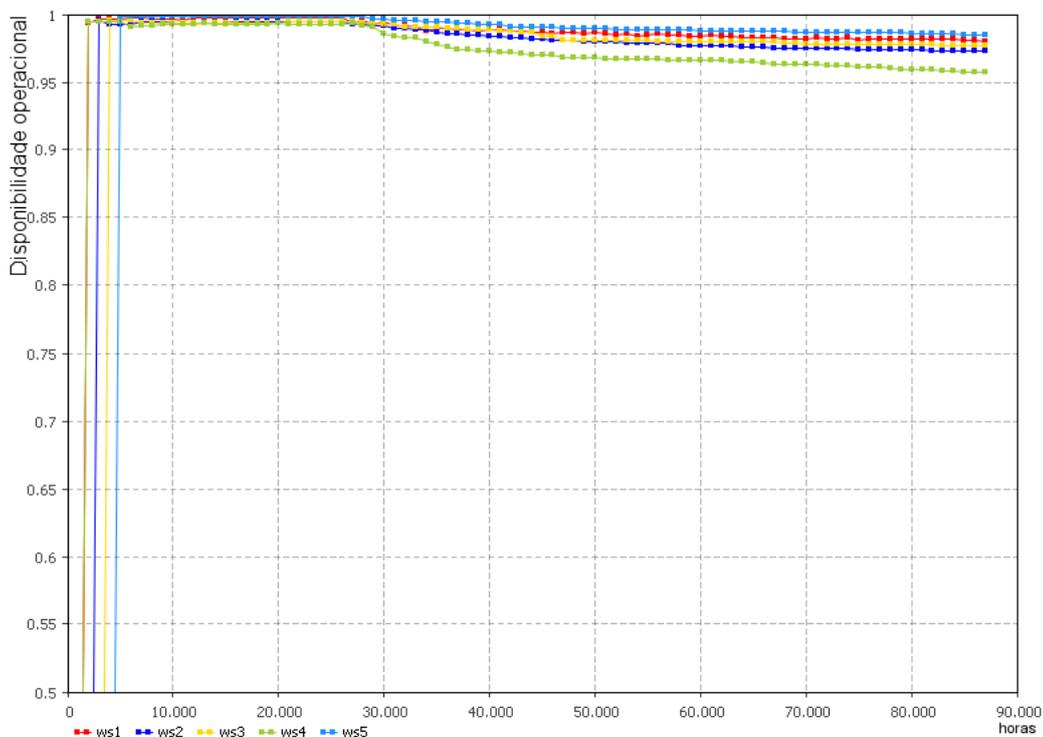


Figura 7.8: Disponibilidade operacional – estudo de caso 2

Tabela 7.5: Parâmetros de entrada – estudo de caso 2

| Parâmetros entrada da simulação - modelo de ativos | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | ws1 | ws2 | ws3 | ws4 | ws5 | ws6 | ws7 | ws8 | ws9 | ws10 |
| Tempo de ciclo | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Vida em serviço (ESL) (h) | 1300 | 2800 | 3300 | 1600 | 4100 | 2200 | 3400 | 4600 | 2500 | 5000 |
| Taxa de amostragem (h) | 6 | 8 | 7 | 6 | 10 | 8 | 6 | 8 | 9 | 7 |
| Constantes do REM | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 | 0.6,0.6 |
| Limite crítico (CL1) (%) | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 |
| Limite de confiabilidade | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| Horizonte de conclusão (h) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Duração do contrato (anos) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Parâmetros de entrada – modelo de execução das atividades de serviço | | | | | | | | | | |
| | ws1 | ws2 | ws3 | ws4 | ws5 | ws6 | ws7 | ws8 | ws9 | ws10 |
| MAD1 (h) = normal (μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MAD2 (h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MAD3 (h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD1 (h) = uniforme(x,y) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| MLD2 (h) = uniforme(x,y) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| MLD3(h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD4 (h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MRT (h) = normal (μ,σ) | 5,0.5 | 9,0.9 | 6,0.6 | 6,0.6 | 4,0.4 | 9,0.9 | 5,0.5 | 4,0.4 | 8,0.8 | 12,1.2 |
| MTD (h) = normal(μ,σ) | 1,0.1 | 2,0.2 | 2,0.2 | 2,0.2 | 1,0.1 | 1,0.1 | 2,0.2 | 1,0.1 | 2,0.2 | 3,0.3 |

Tabela 7.6: Resultados do experimento - estudo de caso 2

| Resultados de simulação e índices de desempenho (3 anos de execução do contrato) | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | ws1 | ws2 | ws3 | ws4 | ws5 | ws6 | ws7 | ws8 | ws9 | ws10 |
| Disponibilidade (%) | 99,8 | 99,5 | 99,5 | 99,3 | 99,9 | 99,4 | 99,8 | 99,9 | 99,5 | 99,6 |
| Total de peças produzidas | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 | 26.283 |
| Utilização (%) | 93,7 | 90,5 | 91,6 | 98,6 | 95,4 | 96,1 | 93,4 | 82,8 | 89,7 | 96,7 |
| <i>Breakdowns/ano</i> | 5,67 | 3,00 | 2,33 | 5,00 | 2,00 | 3,67 | 2,33 | 1,67 | 3,00 | 1,67 |
| Tempo de espera para reparo | 19,2 | 7,4 | 8,9 | 11,8 | 0,0 | 13,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MTTR (h) | 3,53 | 14,14 | 18,07 | 11,74 | 5,83 | 13,58 | 7,34 | 5,19 | 13,04 | 19,18 |
| MTBF (h) | 1.449,14 | 2.642,75 | 3.440,32 | 1.728,86 | 4.178,47 | 2.296,57 | 3.507,99 | 4.355,84 | 2.621,74 | 5.084,65 |
| ABS (MTBF-ESL) (h) | 149,14 | 157,25 | 140,32 | 128,86 | 78,47 | 96,57 | 107,99 | 244,16 | 121,74 | 84,65 |
| Resultados de simulação e índices de desempenho (7 anos de execução do contrato) | | | | | | | | | | |
| | ws1 | ws2 | ws3 | ws4 | ws5 | ws6 | ws7 | ws8 | ws9 | ws10 |
| Disponibilidade (%) | 98,1 | 97,3 | 97,7 | 95,7 | 98,5 | 96,7 | 98,2 | 98,7 | 97,5 | 98,5 |
| Total de peças produzidas | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 | 120.353 |
| Utilização (%) | 94,5 | 99,0 | 99,2 | 94,5 | 98,4 | 96,9 | 98,3 | 99,9 | 99,9 | 99,2 |
| <i>Breakdowns/ano</i> | 9,43 | 4,86 | 4,14 | 7,86 | 3,43 | 6,00 | 4,00 | 3,14 | 5,43 | 2,86 |
| Tempo de espera para reparo | 27,9 | 43,6 | 41,2 | 72,2 | 47,0 | 44,6 | 35,2 | 0,0 | 112,8 | 48,1 |
| MTTR (h) | 19,45 | 54,22 | 55,07 | 53,49 | 44,75 | 54,23 | 44,48 | 41,77 | 46,58 | 51,89 |
| MTBF (h) | 995,62 | 1.965,08 | 2.360,01 | 1.198,87 | 2.847,26 | 1.598,67 | 2.424,11 | 3.124,97 | 1.815,94 | 3.450,10 |
| ABS (MTBF-ESL) (h) | 304,38 | 834,92 | 939,99 | 401,13 | 1252,74 | 601,33 | 975,89 | 1475,03 | 684,06 | 1549,9 |

7.2.3 - Análise dos resultados

Os resultados numéricos obtidos com a execução da simulação são apresentados na tabela 7.6. Observa-se que na primeira fase de execução (isto é nos três primeiros anos) os índices de desempenho alcançaram valores considerados satisfatórios. Em particular, a disponibilidade operacional de todos os ativos esteve acima de 98% indicando ativos com alta disponibilidade que é comumente requisitada para ativos de alto valor agregado. Outro importante resultado é o pequeno desvio entre o MTBF medido e a vida de serviço esperada (ESL). De fato, durante os três primeiros anos de execução do contrato, a média dos desvios absolutos por ano de execução é de 43,64h com um desvio associado de 15,96h.

Ao impor a demanda operacional requisitada foi possível aumentar o tempo de processamento dos ativos por dia de utilização. Todavia, este aumento da demanda de processamento resultou em uma redução da disponibilidade operacional dos ativos (de 98% para 95,7% no pior caso). Em contratos de disponibilidade, em que o pagamento depende da continuidade do serviço fornecido nos níveis requisitados, penalidades podem ser aplicadas ao fornecedor PSS caso os níveis de disponibilidade não sejam alcançados (Phumbua & Tjahjono, 2011a). De fato, ao impor a demanda operacional o fornecedor PSS necessitou intervir duas vezes mais que o esperado para realizar as atividades de serviço. Observa-se também uma redução expressiva no MTBF medido em comparação com o ESL, já que a média dos desvios absolutos por ano (na segunda fase de execução do contrato) subiu para 128,85h com um desvio de 60,77h.

A figura 7.8 ilustra uma redução gradativa da disponibilidade operacional dos ativos na segunda fase de execução do PSS. Esta redução gradativa se deve principalmente a dificuldade da equipe de serviços em responder, adequadamente, as demandas de serviços operacionais e logísticos necessários. Este problema se torna ainda mais evidente quando se compara o tempo total de espera da equipe de serviço obtidos durante a primeira e a segunda fase de execução do contrato. Enquanto na primeira fase este tempo de espera foi de 20,34h, na segunda fase ele subiu para 67,15h resultando em aumento percentual próximo de 300%. Contudo, utilizando os resultados da simulação, o fornecedor PSS pode negociar termos aditivos do contrato de serviços para atender a demanda do cliente e ainda manter os níveis de desempenho almejados.

7.3 - CASO 3: ANÁLISE E SUPORTE A TOMADA DE DECISÕES

Este estudo de caso investiga como um programa PHM pode beneficiar a análise e o suporte a tomada de decisões em um modelo de negócio PSS. De fato, a análise e tomada de decisões é uma atividade relativamente complexa por estar associada às peculiaridades de cada aplicação. Na maioria dos casos, o processo decisório requer uma análise multimodal sob o contexto do problema, em que múltiplos objetivos devem ser simultaneamente atendidos com base em múltiplas premissas, muitas vezes, conflitantes.

7.3.1 - Descrição do estudo de caso

O estudo de caso trata da oferta de serviços para otimizar processos. Serviços para otimizar processos ocorrem quando o cliente do PSS requisita ao fornecedor um auxílio para otimizar algum de seus processos internos. A otimização de processos está geralmente vinculada a necessidade de aumentar a capacidade de processamento dos ativos, a reduzir o tempo de manutenção, reduzir os custos operacionais associados, dentre outros. Nestes casos, o fornecedor PSS utiliza de seu conhecimento técnico ou de parceiros para oferecer uma solução que propicie os resultados almejados pelo cliente. Neste caso, a otimização de processos constitui um importante passo para a co-criação de valores, já que o cliente consegue alcançar os resultados desejados enquanto o fornecedor aumenta seus rendimentos através da oferta de uma solução integrada.

A oferta de otimização de processo considerada neste estudo de caso consiste na redução do número de setups em máquinas CNC. O número de setups pode ser reduzido através do monitoramento do desgaste das ferramentas de corte. O desgaste de uma ferramenta pode ser monitorado de forma indireta sempre que uma relação entre as forças de corte e o desgaste da ferramenta é estabelecida (Ghosha *et al*, 2007). Em princípio, utilizando um sistema de monitoramento do desgaste das ferramentas é possível reduzir o número de setups e assim evitar a abordagem conservadora de setup por número de operações⁸. Isto se torna particularmente importante para os fabricantes que desejam aumentar a disponibilidade dos ativos e ao mesmo tempo reduzir o número de ferramentas em estoque. Maximizar a utilização das ferramentas de

⁸ Na abordagem de setup por número de operações, a ferramenta de corte é substituída sempre que um número limite de operações executadas pela ferramenta de corte é alcançado.

corte é uma das metas que a indústria metal-mecânica busca para reduzir seus custos de fabricação (Palanisamy *et al*, 2008).

7.3.2 - Simulações

Duas simulações foram desenvolvidas para realização deste estudo de caso. A primeira simulação é composta por SAMs e não possui um sistema de monitoramento condicional do desgaste das ferramentas. Desse modo, a troca de ferramentas na primeira simulação é baseada na abordagem conservadora de setup por número de operações. Já a segunda simulação possui somente ativos customizados assistidos por um programa PHM. Este programa oferece dados de monitoramento do desgaste das ferramentas no intuito de assistir as operações de setup. Um sistema de aquisição de dados e um controlador de simulação online também estão presentes na segunda simulação. A figura 7.9 ilustra a simulação online desenvolvida.

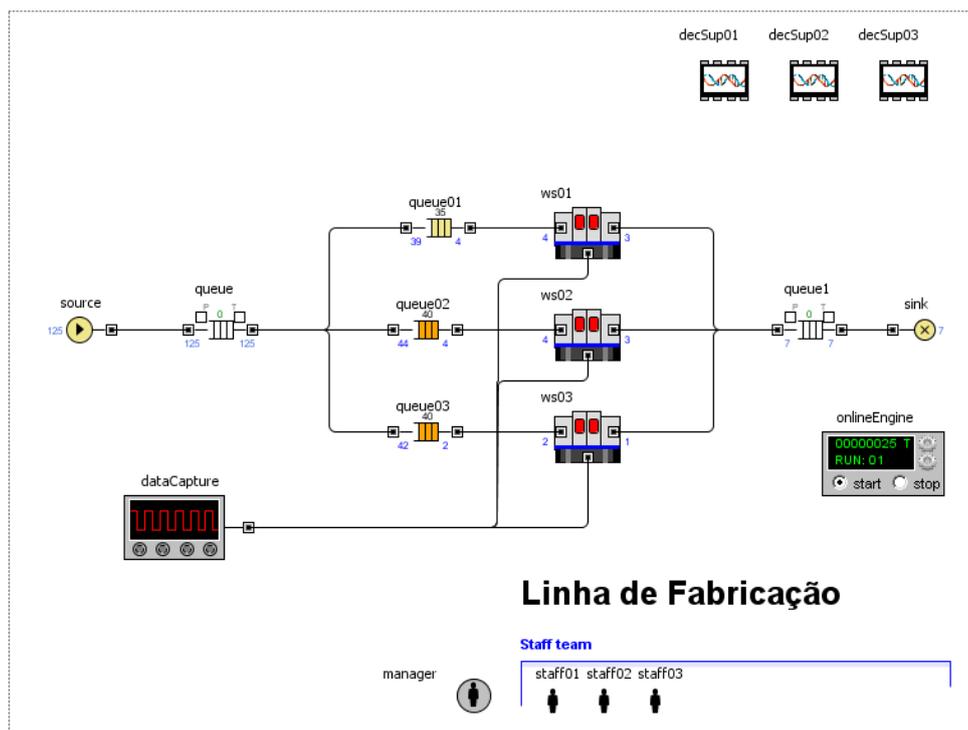


Figura 7.9: Simulação online – estudo de caso 3

Em ambas as simulações cada ativo possui uma ferramenta de corte característica, um *buffer* e um sistema de tomada de decisão associado. O *buffer* recebe da linha de fabricação as peças a serem processadas e as acumula em uma fila de entrada. Uma vez que a quantidade de peças acumuladas é compatível com as necessárias para formar um lote, o *buffer* solicita ao sistema de

tomada de decisão que realize o escalonamento das peças. O escalonamento é realizado por uma técnica de otimização (neste caso, um algoritmo genético proposto por Akturk *et al* (2003)) que as escalona com base no tempo de processamento, na esperança de vida da ferramenta e no tempo médio de setup. Considerando os parâmetros acima mencionados, o algoritmo genético implementado busca então encontrar a seqüência de peças com o menor tempo de processamento.

As simulações também contam com um gerente de operações. Este gerente tem como responsabilidade alocar a equipe de operações que estiver disponível para realizar a troca de ferramenta. Como nas simulações a operação de troca é executada em um único passo, somente um operador é alocado para cada setup. Nas simulações também se considera que os operadores e as ferramentas estão sempre disponíveis, e que as operações de processamento das peças são *não-preemptivas*. Em particular, os ativos da simulação online possuem um REM, sendo o mesmo responsável por estimar a confiabilidade futura da ferramenta de corte com base no estado atual de degradação. A tabela 7.7 mostra os parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

Tabela 7.7: Parâmetros de entrada – estudo de caso 3

| Simulação tradicional | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 |
| METL (operações) | 80 | 80 | 80 |
| MTTS (min) = normal(μ, σ) | 30,0.3 | 30,0.3 | 30,0.3 |
| Tamanho de lote (peças) | 20 | 20 | 20 |
| Suporte para decisão automática | Sim | Sim | Sim |
| Duração do contrato (anos) | 15 | 15 | 15 |
| Simulação online | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 |
| METL (operações) | - | - | - |
| MTTS (min) = normal(μ, σ) | 30,0.3 | 30,0.3 | 30,0.3 |
| Limite crítico (CL1) (%) | 95 | 95 | 95 |
| Tamanho de lote (peças) | 20 | 20 | 20 |
| Suporte para decisão automática | Sim | Sim | Sim |
| Duração do contrato (anos) | 15 | 15 | 15 |
| Módulos de tomada de decisão (GA) | | | |
| | decSup01 | decSup02 | decSup03 |
| Tamanho da população | 100 | 100 | 100 |
| Tamanho do cromossomo | 20 | 20 | 20 |
| Vetor de perturbação | $\pm 3,5$ | $\pm 3,5$ | $\pm 3,5$ |
| Vetor de mutação | $\pm 1,75$ | $\pm 1,75$ | $\pm 1,75$ |
| Probabilidade de mutação | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Número de iterações do GA | 500 | 500 | 500 |

7.3.3 - Experimentos

Este experimento tem por finalidade verificar os benefícios da execução de contratos de serviços com a assistência de um programa PHM. Mais especificamente, os resultados aqui obtidos permitirão avaliar como os dados de monitoramento do desgaste das ferramentas podem assistir tomada de decisões em modelos PSS. Para tanto, duas simulações foram construídas (a primeira com ativos padrões e a segunda somente com ativos customizados). Observa-se que os parâmetros de ambas as simulações são os mesmos incluindo o período de execução do contrato (15 anos). Parâmetros adicionais da simulação online foram inseridos somente para configurar os REM e nada influenciam no resultado da simulação.

Na simulação tradicional, o setup de cada ativo é realizado a partir de um número fixo de operações. Desse modo, uma vez que o número de operações remanescentes da ferramenta for menor que o necessário para executar a próxima operação, o ativo entra em estado de setup. O setup fixo por número de operações é considerada uma abordagem conservadora comumente empregada na indústria, todavia, tem como principal desvantagem a utilização incompleta da ferramenta. Embora as estratégias de gerenciamento de ferramentas sejam comumente realizadas empregando um tempo de vida fixo, na prática se observa que ferramentas idênticas sujeitas as mesmas condições de operação possuem tempo de vida diferentes (Lamond & Sodhi, 2006).

Já na simulação online, o estado de setup é definido com base no monitoramento do desgaste da ferramenta. Assim, utilizando as informações de monitoramento condicional fornecidas por um programa PHM, o REM de cada ativo customizado determina o momento em que o desgaste alcança níveis que comprometam a qualidade da usinagem. Obviamente que para empregar esta abordagem é necessário um conhecimento *a priori* do nível crítico de desgaste de cada ferramenta de corte. Por se considerar que as ferramentas estarão sempre disponíveis, somente o primeiro nível crítico (CL1) será considerado. Os demais parâmetros da simulação como tamanho do lote, tempo médio para o setup (MTTS), parâmetros internos do GA são os mesmos para ambas as simulações.

Um módulo de análise e suporte a tomada de decisão (ASDM) é vinculado a cada ativo em ambas as simulações. Todos os ASDM foram configurados com os mesmos parâmetros, exceto o tempo de vida da ferramenta. O parâmetro tamanho da população indica à quantidade de

indivíduos potenciais candidatos à solução. Tamanho do cromossomo é um parâmetro que deve ser configurado com o mesmo valor do tamanho do lote. O vetor de perturbação especifica a faixa de perturbação que pode ser aplicado a cada indivíduo. O vetor de mutação é aplicado ao indivíduo sempre que houver a mutação em um cromossomo. Número de iterações define um critério de parada na tentativa de uma busca por solução. A regra de seleção elitista é aplicada no decorrer da execução do GA. A tabela 7.8 mostra os resultados obtidos com a realização do experimento.

Tabela 7.8: Resultados dos experimentos – estudo de caso 03

| Resultados do experimento e índice de desempenho (Simulação tradicional) | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 |
| Disponibilidade (%) | 71,5 | 71,4 | 71,6 |
| Total de peças produzidas | 18.071 | 18.071 | 18.071 |
| Utilização (%) | 99,82 | 100,00 | 99,98 |
| Total de setups | 833 | 834 | 832 |
| MTBS medido (min) | 75,20 | 74,99 | 75,25 |
| MTTS medido (min) | 30,00 | 30,01 | 30,02 |
| Resultados do experimento e índice de desempenho (Simulação online) | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 |
| Disponibilidade (%) | 80,5 | 76,8 | 77,6 |
| Total de peças produzidas | 19.496 | 19.496 | 19.496 |
| Utilização (%) | 68,29 | 81,35 | 81,99 |
| Total de setups | 569 | 677 | 653 |
| MTBS medido (min) | 123,91 | 99,41 | 104,23 |
| MTTS medido (min) | 30,03 | 30,00 | 30,02 |

7.3.4 - Análise dos resultados

No primeiro experimento (Exp1), a execução do contrato de serviços foi avaliada utilizando somente os resultados da simulação tradicional. Como esta simulação utiliza uma abordagem de troca conservativa (setup por número de operacionais), a disponibilidade operacional está abaixo da obtida com a simulação online (em média 6,03%). Observa-se também que para esta abordagem conservativa é necessário realizar um maior número de setups (em média 200 setups adicionais). Obviamente que isto leva a uma redução na disponibilidade das equipes de setup e do ativo, maior quantidade de ferramentas em estoque e um aumento do tempo total de processamento.

No segundo experimento (Exp2), o contrato de serviço é avaliado em tempo de execução utilizando a simulação online. Como esta simulação utiliza um programa PHM para monitorar o desgaste das ferramentas, a esperança de vida das ferramentas aumentou (em média 45,3%). O aumento da esperança de vida proporcionou um aumento da disponibilidade operacional dos ativos, uma redução do número de setups e da quantidade de ferramentas disponíveis em estoque. Em particular, a redução do número de setups (em média 200 setups a menos) pode ser convertida em aumento da capacidade de processamento dos ativos proporcionando uma fonte adicional de ganhos tanto para o fornecedor quanto para o cliente PSS.

7.4 - CASO 4: SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO, REPARO E REVISÃO

Este estudo de caso tem por objetivo analisar a oferta de serviços de manutenção, reparo e revisão (MRO) sob o âmbito da interação PSS-PHM. Na indústria de ativos de sistemas complexos (por exemplo, a indústria de aviação) a rentabilidade do modelo de negócio não está somente associada com a venda do ativo, mas principalmente com a oferta de serviços de MRO (Zhu *et al*, 2012). Devido a importância da oferta de serviços de MRO em modelos de negócio PSS, este estudo de caso é inteiramente dedicado a análise desta atividade.

7.4.1 - Descrição do estudo de caso

O estudo de caso em questão consiste em analisar a oferta de serviços de MRO a serem prestados a uma empresa de reforma de transformadores. A empresa possui uma planta fabril com diversos ativos dispostos em três linhas de fabricação e capacidade para reformar transformadores monofásicos e trifásicos. Tanque e parte ativa (núcleo e bobinas) do transformador são inicialmente desmontados e seguem caminhos distintos no processo de reforma. Na primeira linha (denominada reforma do tanque) são realizadas as atividades de reforma e reparo do tanque do transformador. A reforma é formada por uma série de operações sequenciais que incluem: lavagem, preparação, pintura e montagem de acessórios. Na fase de lavagem, resíduos de óleo e sujeira são removidos para que o tanque possa ser reformado. Na fase de preparação, operações de lixar, jateamento e reparo do tanque (serviços de caldeiraria como soldagem, corte, troca de radiadores, etc.) são executados. Já na fase de pintura, o tanque do transformador recebe duas camadas de tinta, sendo a primeira uma camada especial (denominada pintura *primer*). Esta camada tem por finalidade evitar o contato entre o óleo

isolante e o tanque, assim como reduzir a ação de corrosão. Na montagem de acessórios, o tanque recebe presilhas (para prender a tampa ao tanque), flanges e buchas com parafusos.

Na segunda linha de fabricação a parte ativa do transformador é reformada. A reforma da parte ativa também inclui um conjunto de atividades seqüenciais como: preparação, bobinagem BT (baixa tensão), bobinagem AT (alta tensão), montagem/ligação, ensaio e secagem. Na fase de preparação, o material utilizado para a confecção das bobinas é preparado de acordo com as especificações particulares de cada projeto. Durante a bobinagem BT, as bobinas de baixa tensão do transformador são enroladas respeitando-se as especificações de projeto. A bobinagem AT é realizada posteriormente sobre a bobina BT. Uma vez que as bobinas BT e AT estejam prontas, a parte ativa é montada e ligada por um processo de soldagem. Após a fase de ligação da parte ativa, um ensaio é realizado para verificar a relação de transformação do transformador (TTR). Caso aprovado, a parte ativa segue para a montagem da estufa onde irá permanecer por 48 a 72 horas, para garantir a retirada completa de toda umidade. Na terceira e última linha de fabricação (denominada estágio final e de montagem), tanque e parte ativa são acoplados. O transformador, agora montado, segue para uma câmara de vácuo onde irá receber o óleo isolante tratado. Após receber o óleo, o transformador é então fechado e segue para a sala de controle da qualidade, para que ensaios de curto-circuito e ensaio a vazio sejam então realizados. Uma vez aprovado, o transformador recebe uma etiqueta de certificação e é então enviado para o estoque.

7.4.2 - Simulações

As simulações são compostas por dez ativos que modelam as operações executadas na planta fabril. Considera-se que nas simulações todos os ativos estão sujeitos a falhas (exceto os ativos ws04, ws07 e ws10 que representam atividades manuais executadas). Além disso, na simulação online os ativos ws02 e ws08 são assistidos por um programa PHM, isto porque uma falha não-programada dos mesmos pode afetar, de forma significativa, a produção da fábrica. Um elemento *source* gera as ordens de fabricação para a simulação. Um elemento *split* modela o processo de separação do tanque e da parte ativa do transformador, sendo uma entidade enviada para a linha de reforma do tanque e a outra para a linha de reforma da parte ativa. Na linha de reforma do tanque, as operações de lavagem, preparação, pintura e montagem são representadas respectivamente por quatro ativos. O tempo de ciclo dos ativos foi configurado de acordo com os dados extraído do controle da produção.

Na linha de reforma da parte ativa, o processo de preparação do material é incorporado na bobinagem BT (representado na simulação pelo ativo ws05). Os demais processos como bobinagem AT, montagem/ligação/ensaio e secagem são representados respectivamente pelos ativos ws06, ws07 e ws08. Um elemento *selectOutput* entre ws07 e ws08 com probabilidade de 0.05 de reprovação é utilizado para direcionar a parte ativa para a próxima estação de trabalho (caso aprovada no teste) ou para retrabalho (caso reprovada). Um elemento *batch* é utilizado para agrupar uma quantidade mínima necessária de parte ativas para utilizar a estufa. Após a secagem, um elemento *unbatch* desagrupa as partes ativas para que possam ser enviadas para a linha de estágio final e montagem. Outro elemento *selectOutput* com probabilidade de 0,10 de reprovação direciona o transformador para o estoque quando o mesmo estiver pronto ou para ser reprojetoado (no caso de reprovação do teste). O tempo de ciclo de cada ativo também foi extraído com base nos dados de controle da produção.

7.4.3 - Experimentos

Dois experimentos foram realizados para avaliar a oferta de serviços de MRO. No primeiro experimento, uma simulação somente com SAMs é utilizado. Embora alta disponibilidade ainda seja requisitada para os ativos ws02 e ws08, nenhum dos ativos representados é assistido por um programa PHM nesta simulação. Os parâmetros de entrada da simulação (tabela 7.9) foram definidos de acordo com as informações fornecidas pela empresa. Já na simulação online, o serviço de MRO também é ofertado para todos os ativos. Todavia, alta disponibilidade operacional deve ser garantida, em particular, para os ativos ws02 e ws08 já que uma interrupção não-programada pode acarretar em sérios prejuízos financeiros. Os parâmetros de entrada da simulação (tabela 7.10) são semelhantes aos definidos na tabela 7.09, exceto para os ativos ws02 e ws08 assistidos por um programa PHM. A tabela 7.11 apresenta os resultados da execução das simulação para o período contratual estipulado.

7.4.4 - Análise de resultados

No primeiro experimento (Exp01), a execução do contrato de serviços é avaliada utilizando somente os resultados da simulação tradicional. No período contratual de execução dos serviços (10 anos), 87.428 transformadores foram reformados, sendo 78.849 aprovados e 8.633 reprovados no teste de controle da qualidade. A disponibilidade operacional dos ativos esteve acima dos 98%, exceto para os ativos ws02 e ws08 que obtiveram 94,9 e 95,9% respectivamente. Observa-se também que pelo fato dos ativos ws04, ws07 e ws10 representarem atividades manualmente executadas, eles não estiveram sujeitos a falha. Observa-se também que os ativos ws02 e ws08 foram os que obtiveram o maior número de falhas no período. Isto impacta diretamente no planejamento dos recursos para a execução de serviços de MRO.

No segundo experimento (Exp02), a execução do contrato de serviços é avaliada utilizando os resultados de uma simulação online. Isto significa que os ativos assistidos por um programa PHM (isto é, ws02 e ws08) possuem seus respectivos estados de saúde definidos a partir de dados reais capturados. Em particular, a disponibilidade operacional dos ativos ws02 e ws08 aumentou de 94,9 para 99,2% e de 95,9% para 99,3% respectivamente, assim como o número de interrupções para reparo diminuiu de 78 para 45 (ativo ws02) e de 67 para 41 (ativo ws08). Os demais ativos obtiveram desempenho semelhante e, portanto, não são aqui comentados. Contudo, os resultados positivos confirmaram que a partir de um programa PHM é possível garantir alta disponibilidade dos ativos. Mais do que isso, as informações adicionais fornecidas pelo programa PHM permitiram um melhor planejamento das atividades logísticas e operacionais reduzindo de forma considerável o tempo de interrupção dos ativos mencionados.

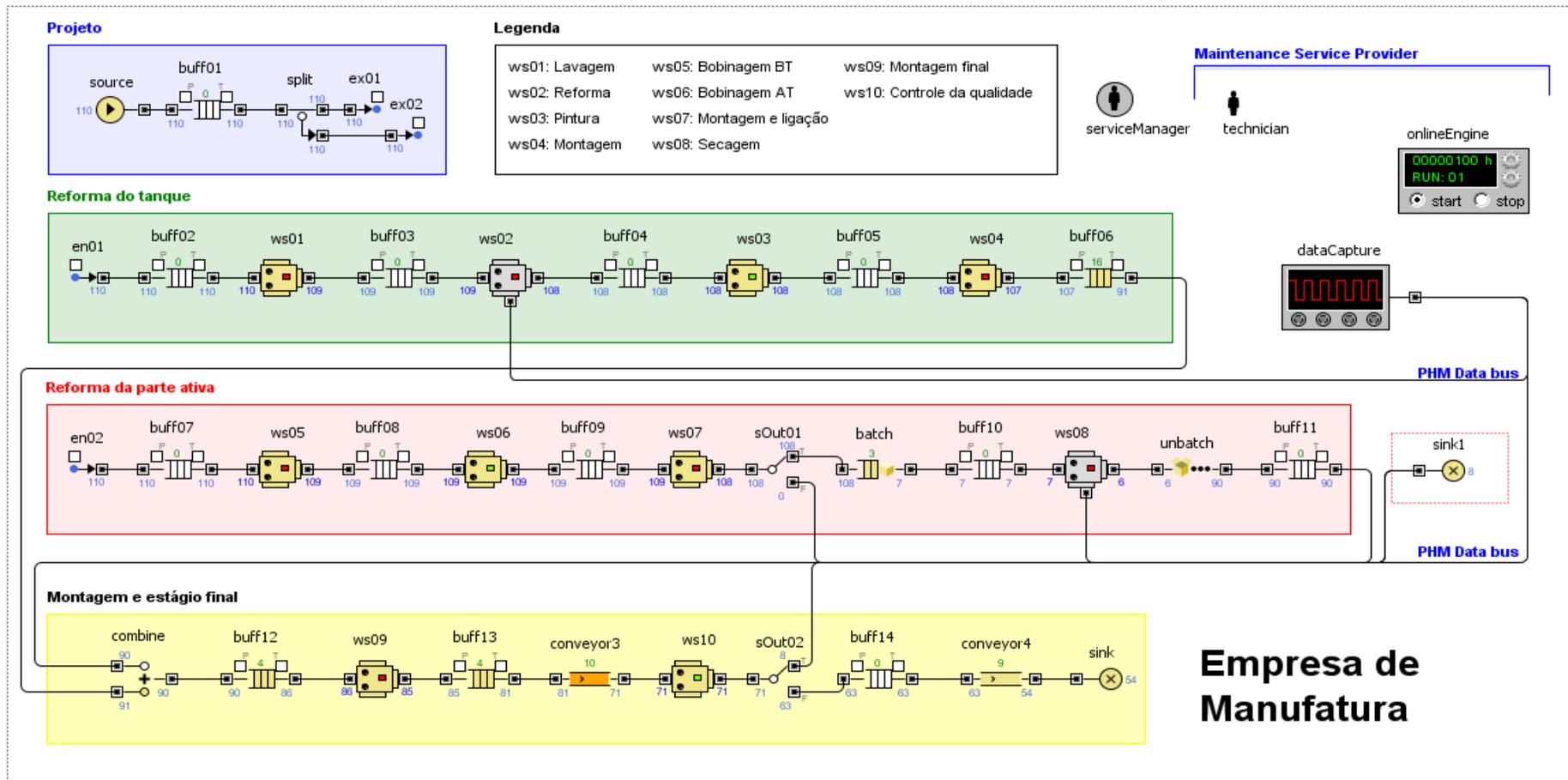


Figura 7.10: Simulação online – estudo de caso 4

Tabela 7.9: Parâmetros de entrada (simulação tradicional) – estudo de caso 04.

| Parâmetros entrada – Simulação tradicional | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| Tempo de ciclo | 0,537 | 0,541 | 0,555 | 0,635 | 0,518 | 0,473 | 0,497 | 0,513 | 0,635 | 0,635 |
| MTBF (h)=exponencial(x) | 3.100 | 1.800 | 4.100 | - | 3.800 | 3.700 | - | 1.300 | 5.400 | - |
| Duração do contrato (anos) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Parâmetros de entrada – modelo de serviços MRO | | | | | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| MAD1 (h) = uniform(x,y) | 0.1,0.2 | 0.1,0.2 | 0.1,0.2 | 0,0 | 0.1,0.2 | 0.1,0.2 | 0,0 | 0.1,0.2 | 0.1,0.2 | 0,0 |
| MAD2 (h) = uniform(x,y) | 2,12 | 2,12 | 2,12 | 0,0 | 2,12 | 2,12 | 0,0 | 2,12 | 2,12 | 0,0 |
| MAD3 (h) = normal(μ,σ) | 2,0.2 | 3,0.3 | 4,0.4 | 0,0 | 3,0.3 | 5,0.5 | 0,0 | 2,0.2 | 3,0.3 | 0,0 |
| MLD1 (h) = uniform(x,y) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD2 (h) = uniform(x,y) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD3(h) = triangular(x,y) | 12,48 | 12,48 | 12,48 | 0,0 | 12,48 | 12,48 | 0,0 | 12,48 | 12,48 | 0,0 |
| MLD4 (h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MRT (h) = normal(μ,σ) | 2,0.2 | 3,0.3 | 1,0.1 | 0,0 | 4,0.4 | 3,0.3 | 0,0 | 4,0.4 | 2,0.2 | 0,0 |
| MTD (h) = normal(μ,σ) | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 |

Tabela 7.10: Parâmetros de entrada (simulação online) – estudo de caso 04.

| Parâmetros entrada – Simulação online | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| Tempo de ciclo | 0,537 | 0,541 | 0,555 | 0,635 | 0,518 | 0,473 | 0,497 | 0,513 | 0,635 | 0,635 |
| MTBF (h)=exponencial(x) | 3.100 | 1.800 | 4.100 | - | 3.800 | 3.700 | - | 1.300 | 5.400 | - |
| Taxa de amostragem (h) | - | 2 | - | - | - | - | - | 2 | - | - |
| Constantes do REM | - | 0.6,0.6 | - | - | - | - | - | 0.6,0.6 | - | - |
| Limite crítico (CL1) (%) | - | 75 | - | - | - | - | - | 75 | - | - |
| Limites de confiabilidade | - | 0,15 | - | - | - | - | - | 0,15 | - | - |
| Horizonte de conclusão (h) | - | 5 | - | - | - | - | - | 5 | - | - |
| Duração do contrato (anos) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Parâmetros de entrada – modelo de serviços MRO | | | | | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| MAD1 (h) = uniform(x,y) | 0.1,0.2 | 0,0 | 0.1,0.2 | 0,0 | 0.1,0.2 | 0.1,0.2 | 0,0 | 0,0 | 0.1,0.2 | 0,0 |
| MAD2 (h) = uniform(x,y) | 2,12 | 1,4 | 2,12 | 0,0 | 2,12 | 2,12 | 0,0 | 1,4 | 2,12 | 0,0 |
| MAD3 (h) = normal(μ,σ) | 2,0.2 | 0,0 | 4,0.4 | 0,0 | 3,0.3 | 5,0.5 | 0,0 | 0,0 | 3,0.3 | 0,0 |
| MLD1 (h) = uniform(x,y) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD2 (h) = uniform(x,y) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MLD3(h) = triangular(x,y) | 12,48 | 1,12 | 12,48 | 0,0 | 12,48 | 12,48 | 0,0 | 1,12 | 12,48 | 0,0 |
| MLD4 (h) = normal(μ,σ) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| MRT (h) = normal(μ,σ) | 2,0.2 | 3,0.3 | 1,0.1 | 0,0 | 4,0.4 | 3,0.3 | 0,0 | 4,0.4 | 2,0.2 | 0,0 |
| MTD (h) = normal(μ,σ) | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 | 0.5,0.05 | 0.5,0.05 | 0,0 |

Tabela 7.11: Resultados dos experimentos – estudo de caso 04.

| Resultados do experimento – Simulação tradicional | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| Disponibilidade (%) | 98,3 | 94,9 | 98,9 | 100,0 | 98,9 | 99,0 | 100,0 | 95,9 | 99,2 | 99,9 |
| Total de trafos produzidos | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 | 78.849 |
| Total de trafos reprovados | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 | 8.633 |
| Utilização (%) | 53,69 | 54,05 | 55,55 | 99,99 | 51,77 | 47,34 | 49,69 | 79,98 | 63,47 | 63,38 |
| <i>Breakdowns</i> | 31 | 78 | 23 | 00 | 14 | 22 | 00 | 67 | 19 | 00 |
| MTBF (h) | 2.587 | 1051 | 3.733 | - | 5.585 | 3.479 | - | 1.252 | 4.146 | - |
| MTTR (h) | 43,67 | 56,26 | 43,10 | - | 62,21 | 35,99 | - | 54,10 | 32,14 | - |
| Resultados do experimento – Simulação online | | | | | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | ws06 | ws07 | ws08 | ws09 | ws10 |
| Disponibilidade (%) | 99,1 | 99,2 | 98,4 | 100,0 | 98,7 | 98,3 | 100,0 | 99,3 | 98,7 | 100,0 |
| Total de trafos produzidos | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 | 78.818 |
| Total de trafos reprovados | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 | 8.707 |
| Utilização (%) | 53,7 | 52,6 | 55,5 | 63,5 | 51,8 | 47,3 | 49,7 | 75,3 | 63,5 | 63,4 |
| <i>Breakdowns</i> | 29 | 45 | 23 | 00 | 23 | 28 | 00 | 41 | 25 | 00 |
| MTBF (h) | 2.955 | 1.896 | 3.459 | - | 3.412 | 2.840 | - | 2.088 | 3.350 | - |
| MTTR (h) | 26,18 | 14,91 | 56,17 | - | 43,88 | 50,42 | - | 15,06 | 42,69 | - |

7.5 - CASO 5: SERVIÇO DE GERENCIAMENTO DE FERRAMENTAS

Este estudo de caso tem por objetivo analisar a utilização de uma simulação desenvolvida com base no *framework* proposto para auxiliar o serviço de gerenciamento de ferramentas que pode ser oferecido pelo fornecedor PSS. De fato, serviços de gerenciamento de ferramentas e consumíveis estão entre os pacotes de serviços tipicamente disponibilizados a clientes de máquinas-ferramentas (Zhu *et al*, 2011). Ao oferecer um serviço de gerenciamento de ferramentas, o fornecedor PSS utiliza de sua experiência e conhecimento para promover o processo de otimização das ferramentas (tipo, durabilidade, etc.) com o objetivo final de alcançar elevado desempenho (Azarenko *et al*, 2007).

7.5.1 - Descrição do estudo de caso

As simulações deste estudo de caso foram desenvolvidas com base nos dados de uma empresa fabricante de motores de veículos na Inglaterra. A empresa em questão está investindo fortemente no desenvolvimento de simulações da planta fabril para auxiliar sua equipe de engenharia em tomada de decisões. A modelagem total da planta é uma filosofia implantada pela empresa que prevê o desenvolvimento e a otimização de simulações não só da linha de fabricação, mas também das linhas auxiliares e de suporte. Uma das linhas auxiliares que está inserida no processo de desenvolvimento de simulações é a linha de fornecimento, reforma e armazenagem de ferramentas (*tool crib*).

As práticas de modelagem comumente utilizada pelas empresas assumem que as ferramentas sempre alcançam a vida útil esperada e que elas estão sempre disponíveis nos armazéns para substituição. Entretanto, sabe-se que na prática as ferramentas podem não alcançar ou até mesmo superar a vida útil esperada e que os recursos das linhas auxiliares são limitados, além disso, tem-se uma constante pressão para reduzir o estoque de ferramentas. Nesse sentido, a empresa em questão está investindo no desenvolvimento de simulações que representem, de forma mais fidedigna, sua planta fabril. Contudo, uma das premissas destes novos modelos é incorporar estratégias de entrega de ferramentas que busquem minimizar a interrupção das linhas de fabricação, das operações nas linhas auxiliares e que utilizem somente um conjunto mínimo de ferramentas necessárias.

A primeira simulação desenvolvida para atender a esta necessidade foi proposta por Tjahjono & Ladbroom (2011). Nesta simulação, as operações da linha auxiliar e de suporte a ferramenta foram levantadas com base em entrevistas e dados coletados da empresa. De acordo com os autores, a simulação desenvolvida permite que engenheiros definam estratégias da linha de suporte a ferramenta de forma mais efetiva (como configuração dos equipamentos, quantidade de funcionários e níveis de estoque de ferramentas, etc.). Isto é particularmente importante para a equipe de engenharia da empresa, já que constitui uma ferramenta essencial para auxiliar as tomadas de decisão.

Embora a simulação proposta seja uma notória contribuição para a modelagem total da planta, a estratégia de troca de ferramentas ainda é baseada na abordagem conservadora de troca por número de operações. Em outras palavras, um grupo de ferramentas (até 3 ferramentas) com o menor número de operações remanescente é substituído em uma única operação de setup. Neste sentido, a simulação online proposta neste estudo de caso pode levar a uma melhor tomada de decisão ao considerar a substituição de ferramentas com base nos dados de monitoramento condicional de desgaste. Esta simulação então constitui uma importante ferramenta, em particular, para fornecedores PSS que desejam oferecer serviços de gerenciamento de ferramentas.

7.5.2 - Modelo da linha de fabricação

A primeira simulação desenvolvida foi utilizada para representar a linha de fabricação (CNC Block/Head Line). Embora a fábrica possua diversas linhas de fabricação, esta simulação representa apenas uma linha de fabricação de blocos de motores e cabeçotes, já que o principal objetivo deste estudo de caso é investigar a utilização da linha de suporte e não a de fabricação. Na simulação proposta, um bloco ou um cabeçote de um motor é representado por uma instância da classe *CEnginePart*, classe desenvolvida que encapsula atributos e comportamentos que distingue as peças por suas características de fabricação e roteamento. Observa-se que o número de máquinas CNC é o mesmo atualmente empregado em linhas de fabricação da empresa. Linhas auxiliares de verificação e controle da qualidade também foram inseridas nesta mesma simulação. A figura 7.11 ilustra a simulação da linha de fabricação.

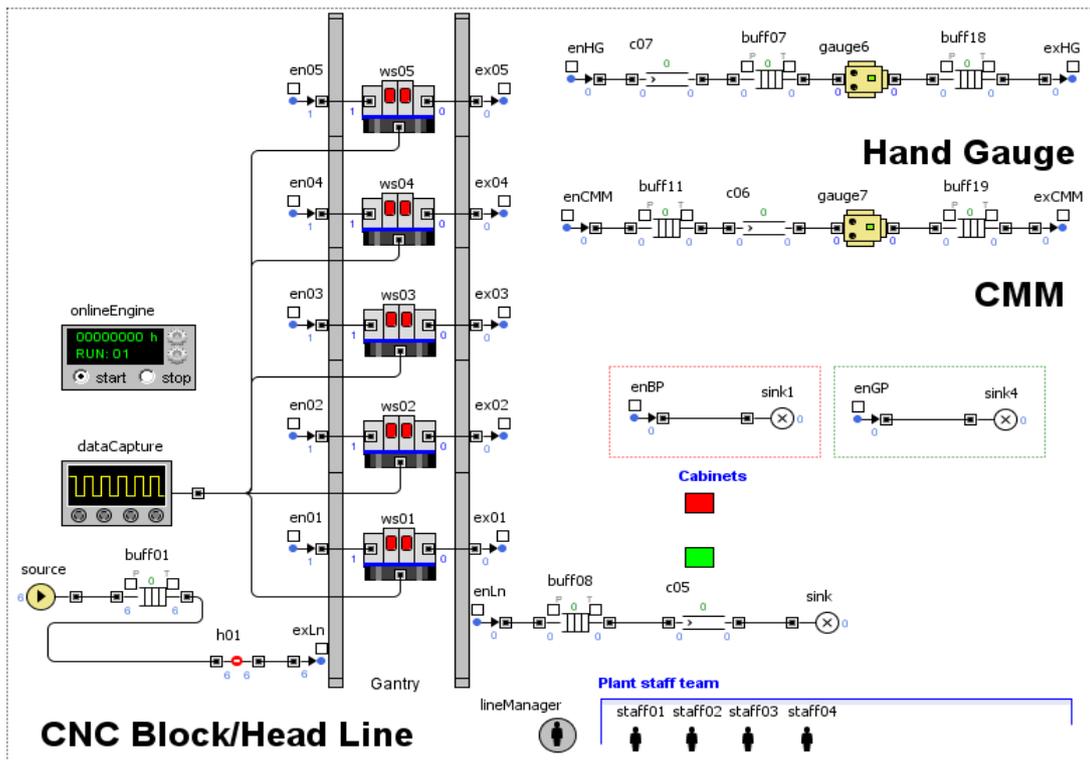


Figura 7.11: Simulação online da linha de fabricação

A simulação foi desenvolvida com base em uma série de entrevistas e documentos disponibilizados pela equipe de engenharia da empresa. Desse modo, a seqüência de eventos da simulação representa, de forma fidedigna, as atividades que ocorrem no chão - de - fábrica. A execução da simulação inicia com o fornecimento de peças para a linha de fabricação (CNC Block/Head Line). As máquinas CNC realizam as operações necessárias para a fabricação da peça e uma vez que a ferramenta de corte atinge um número limite de operações previamente especificado, uma mensagem é enviada ao gerente da linha para que a ferramenta possa ser devidamente substituída. O setup da máquina é realizado em duas etapas: troca de ferramenta e controle de qualidade. A primeira etapa é composta por um conjunto de atividades realizadas pelo operador. Desse modo, este inicia a troca de ferramenta colocando a máquina no fim de ciclo (EOC). Uma vez que a máquina está no EOC, o operador remove a ferramenta usada e coloca a máquina na posição HOME. Uma vez que a máquina está nesta posição, a ferramenta nova é inserida no carrossel e o ciclo de máquina é ativado. Todas as atividades desenvolvidas durante a troca de ferramenta são representadas na simulação pelo parâmetro dinâmico MTTC (*Mean Time to Tool Change*).

Uma vez que a troca de ferramenta é realizada, a máquina CNC realiza a usinagem de uma peça com a nova ferramenta inserida. A peça usinada é então enviada para a linha de controle de qualidade com máquinas de medição de coordenadas (CMM ou *Hand Gauge*) para se realizar o controle dimensional da peça usinada. Nestas linhas, medições geométricas da superfície usinada são realizadas e comparadas com valores de referência e limites de tolerância dimensional. Caso as medições estejam dentro dos limites de tolerância especificadas, a nova ferramenta é aprovada e a máquina CNC liberada para a linha de fabricação. Caso a nova ferramenta seja reprovada pelo controle de qualidade, ela deve ser substituída por outra e as atividades de setup de máquinas são reiniciadas. A figura 7.12 ilustra a lógica e as variáveis da simulação desenvolvida.

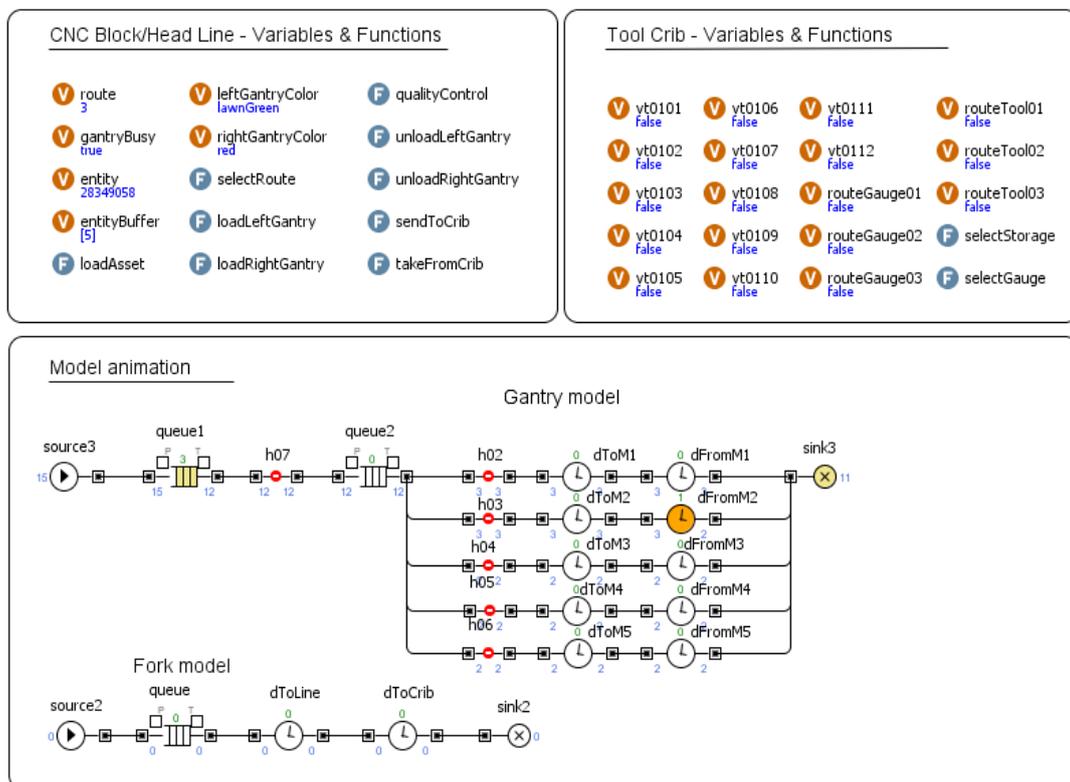


Figura 7.12: Lógica e variáveis da simulação

7.5.3 - Modelo de linha auxiliar e de suporte a ferramentas

As atividades da linha auxiliar iniciam com a chegada das ferramentas usadas na linha de fabricação. As ferramentas são então entregues no *cabinet* e posteriormente enviadas para a linha auxiliar. Na linha auxiliar, as ferramentas são inicialmente lavadas para a remoção de sujeira e óleo. Posteriormente, elas seguem para a área de resfriamento que pode ser natural ou

induzido. Após serem resfriadas, as ferramentas passam por procedimentos de aferição e afiação. Uma vez afiadas e aferidas, elas seguem para seus respectivos armazéns. Observa-se que embora esta seja a seqüência de procedimentos a ser realizada, dependendo da ferramenta, ela pode ou não passar inicialmente por um processo de medição dimensional.

A figura 7.13 ilustra a simulação que representa a linha auxiliar e de suporte a ferramenta. Cada ferramenta é representada por uma instância da classe *CToolPart* que possui todos os atributos e comportamentos necessários para representar uma ferramenta. O mecanismo de rota é definido com base no atributo *route* lido na simulação a cada passagem da ferramenta por um ativo. Com relação aos medidores (*gauges*), as ferramentas podem então seguir três rotas distintas. Estas rotas são definidas com base nas características físicas de cada ferramenta. Contudo, uma vez que as ferramentas são medidas e afiadas, elas seguem para a estação de reserva para que possam ser cadastradas como disponíveis. Uma vez cadastradas como disponíveis, elas são enviadas para a área de armazenagem. A tabela 7.12 especifica os parâmetros de entrada para a simulação.

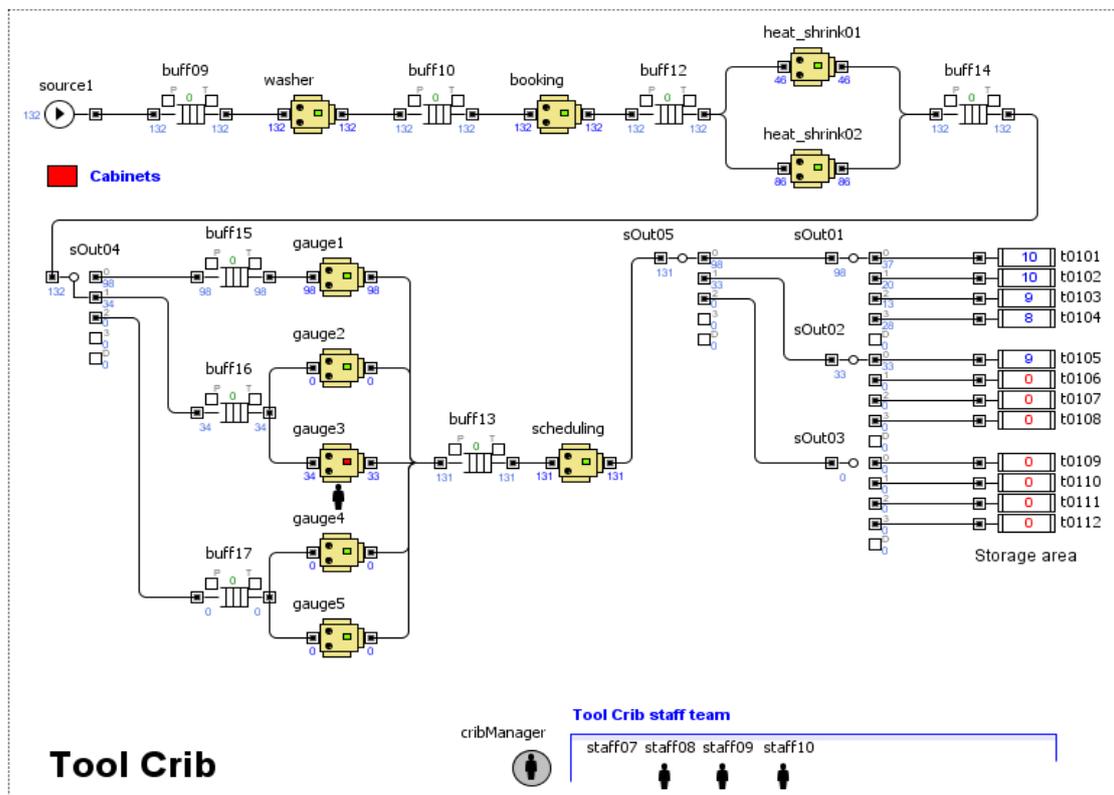


Figura 7.13: Modelo da linha auxiliar e de suporte a ferramentas

Tabela 7.12: Parâmetros de entrada – estudo de caso 05

| Parâmetros de entrada – CNC block/head line (Simulação tradicional) | | | | | | |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | cmm |
| Tempo de ciclo (min) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1,13 |
| Tool Life (operações) | 75 | 150 | 250 | 100 | 75 | - |
| MTTC (min) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | - |
| Duração do contrato (anos) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Parâmetros de entrada – CNC block/head line (Simulaçãoonline) | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | Cmm |
| Tempo de ciclo (min) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1,13 |
| Constantes do REM | 0,6;0,6 | 0,6;0,6 | 0,6;0,6 | 0,6;0,6 | 0,6;0,6 | - |
| Limite crítico (CL1) (%) | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | - |
| Limite de confiabilidade | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | - |
| Horizonte de conclusão (h) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | - |
| Duração do contrato | 5 anos | 5 anos | 5 anos | 5 anos | 5 anos | 5 anos |
| Parâmetros de entrada – Tool Crib | | | | | | |
| | washer | booking | shrink1 | shrink2 | gauge1 | gauge2 |
| Tempo de ciclo (min) | 6 | 5 | 33 | 12 | 40 | 40 |
| | gauge3 | gauge4 | gauge5 | storage | | |
| Tempo de ciclo (min) | 40 | 40 | 40 | 15 | | |
| Parâmetros de entrada – Miscellaneous (travel time) | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | tool crib |
| Trolley (min) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Gantry (seconds) | 12,66 | 14,06 | 15,48 | 16,91 | 18,33 | - |

7.5.4 - Experimentos

Dois experimentos foram realizados para analisar a oferta de serviços de gerenciamento de ferramentas. No primeiro experimento (Exp01), a simulação da linha de fabricação possui somente ativos padrões (SAMs). Nestes ativos, a troca de ferramenta é baseada em número de operações e uma vez que este número for alcançado, o ativo entra no estado de setup e sua ferramenta deve então ser substituída. Já no segundo experimento (Exp02), a linha de fabricação da simulação é formada somente por ativos personalizados (CAMs). Isto significa que os ativos da linha são assistidos por um programa PHM, sendo este programa utilizado para realizar o

monitoramento condicional do desgaste da ferramenta. Em outras palavras, os dados do programa PHM são incorporados na representação dos ativos para que seus respectivos REM verifiquem a probabilidade do estado de setup.

O período de execução do contrato de serviços é de cinco anos para ambos os casos. O tempo de ciclo dos ativos, tanto da linha de fabricação quanto da linha auxiliar e de suporte da ferramenta foram configurados de acordo com os dados obtidos da empresa. A análise com dados reais torna os resultados obtidos ainda mais importante, já que o planejamento de recursos para auxiliar as atividades da linha de fabricação (número de ferramentas, funcionários, etc.) se torna mais fidedigno com o que acontece na realidade. Observa-se que por se tratar de uma análise posterior ao estabelecimento do contrato de serviços, não se considera a modificação do número de ativos a serem empregados. A tabela 7.13 ilustra os resultados obtidos com a execução dos dois experimentos.

Tabela 7.13: Resultados dos experimentos – estudo de caso 05

| Resultado do experimento 01 – modelo tradicional | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | cmm |
| Disponibilidade (%) | 99,1 | 99,4 | 99,6 | 99,1 | 98,8 | 100,0 |
| Total de peças produzidas | 1.269.122 | 1.269.122 | 1.269.122 | 1.269.122 | 1.269.122 | - |
| Total de peças reprovadas | 934 | 934 | 934 | 934 | 934 | - |
| Utilização(%) | 97,1 | 97,2 | 97,1 | 97,1 | 97,0 | 0,6 |
| Número de setups | 6.746 | 3.394 | 2.038 | 5.074 | 6.744 | - |
| MTBS (h) | 12,7 | 25,5 | 42,7 | 17,0 | 12,7 | - |
| MTTS (min) | 9,30 | 18,49 | 9,29 | 9,27 | 9,30 | - |
| Ferramentas (quantidade) | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | - |
| Resultado do experimento 02 – modelo online | | | | | | |
| | ws01 | ws02 | ws03 | ws04 | ws05 | cmm |
| Disponibilidade (%) | 99,1 | 99,5 | 99,7 | 99,3 | 99,1 | 100 |
| Total peças produzidas | 1.273,216 | 1.273,216 | 1.273,216 | 1.273,216 | 1.273,216 | - |
| Total peças reprovadas | 1.023 | 1.023 | 1.023 | 1.023 | 1.023 | - |
| Utilização(%) | 97,0 | 97,0 | 96,8 | 96,9 | 96,0 | 0,57 |
| Número de setups | 5.070 | 2.606 | 1.590 | 3.758 | 4.822 | - |
| MTBS (h) | 16,97 | 33,31 | 54,79 | 23,01 | 17,86 | - |
| MTTS (min) | 9,14 | 17,77 | 9,13 | 9,21 | 9,34 | - |
| Ferramentas (quantidade) | 9 | 8 | 8 | 9 | 8 | - |

7.5.5 - Análise dos resultados

Os resultados obtidos com a execução dos experimentos são apresentados na tabela 7.13. Observa-se que durante todo o período de execução do contrato (cinco anos), a disponibilidade operacional em ambas as simulações não foi modificada. Um pequeno aumento no número de blocos/cabeçotes produzidos foi observado quando se compara os resultados da simulação tradicional com a simulação online. Por outro lado, um aumento percentual médio de 33,7% foi observado quando se compara o MTBS da simulação online com a simulação tradicional. Este aumento também resultou na redução do número de setups realizados para o período contratual (6.746 para 5.070 – ws01; 3.394 para 2.606 – ws02; 2.038 para 1.590 – ws03; 5.074 para 3.758 – ws04; 6.744 para 4.822 – ws05), assim como em uma redução do número de ferramentas em estoque.

Embora não se observe um aumento significativo no número de peças produzidas, o emprego do programa PHM, para monitorar o desgaste das ferramentas, proporcionou um aumento médio da vida útil das ferramentas. Este aumento conduziu a uma redução no número de setups realizados e, por conseguinte, no nível mínimo de ferramentas disponíveis em estoque. Ainda que a redução do nível de estoque tenha sido pequena, ela se torna significativa quando considerado a quantidade de ferramentas que um centro de usinagem da fábrica pode receber (até 43 ferramentas), assim como todas as linhas de fabricação disponíveis na empresa. Por este motivo, as informações de monitoramento proporcionadas pelo programa PHM foram essenciais para promover um gerenciamento mais otimizado das ferramentas proporcionando uma fonte adicional de ganhos tanto para o cliente (redução do número de ferramentas em estoque) quanto para o fornecedor (nova oportunidade de negócio).

7.6 - SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os estudos de casos realizados para validar o *framework* para a interação PSS-PHM proposto. Os cinco estudos de caso demonstraram numericamente os benefícios da interação PSS-PHM, assim como ela pode ser explorada para promover novas oportunidades de negócio. O primeiro foi dedicado à prova do conceito e validação do REM. O segundo e o terceiro trataram especificamente de demandas operacionais e da oferta de serviços de otimização. Os dois últimos foram realizados utilizando dados de indústrias e investigaram a oferta de serviços de MRO e de gerenciamento de ferramentas.

8 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões e as contribuições associadas ao desenvolvimento desta pesquisa, assim como as limitações e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema. Inicialmente são apresentadas as conclusões confrontando-se os objetivos deste trabalho com os resultados alcançados. Posteriormente são descritas as contribuições da metodologia de pesquisa, contribuições técnicas e de ferramentas. Em seguida são apresentadas as limitações da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

8.1 - CONCLUSÕES DA PESQUISA

Nesta seção são apresentadas as conclusões associadas a esta pesquisa. Com base na descrição dos fundamentos e nos resultados experimentais obtidos é possível responder, de forma mais precisa, as indagações relacionadas ao objetivo da pesquisa. De fato, este trabalho tem como principal objetivo:

“Investigar a interação entre Prognóstico e Gerenciamento da Saúde e Sistema-Produto Serviço para o Suporte de Decisões Operacionais”

Com base no objetivo deste trabalho, as seguintes indagações foram realizadas:

- 1) Qual o cenário típico para se adotar uma solução PSS-PHM?
- 2) Como tratar comportamentos dinâmicos em um modelo de negócio PSS?
- 3) Quais são os índices de desempenho sobre a interação PSS-PHM?
- 4) Como alcançar uma efetiva interação PSS-PHM?
- 5) Quais são os benefícios de negócios oriundos da interação PSS-PHM?

Conforme estabelecido no fundamento 01, o cenário típico para adotar um programa PHM em um modelo de negócio PSS é definido pelas necessidades das partes interessadas. Do ponto de vista do cliente PSS, um programa PHM deve ser adotado sempre que houver uma necessidade inerente de garantir alta confiabilidade ou disponibilidade dos ativos. Isto foi devidamente comprovado no estudo de caso 03 a partir do monitoramento condicional do desgaste da

ferramenta. O monitoramento condicional proporcionou um aumento médio de 45,3% do tempo de vida útil das ferramentas, sendo este aumento diretamente utilizado para reduzir o número de setups aumentando, por conseguinte a disponibilidade dos ativos.

Sob a perspectiva do fornecedor PSS, a oferta de um modelo de negócio PSS com suporte de um programa PHM somente se torna interessante quando isto se transforma em uma considerável vantagem competitiva. Isto porque os custos adicionais associados a um programa PHM devem ser compensados pela fidelização dos clientes e por novas oportunidades de negócio. Dentre as possíveis ofertas associadas a um programa PHM estão: melhoria do desempenho dos ativos, altos índices de confiabilidade e de disponibilidade, treinamento e consultoria, etc. De fato, estabelecer um modelo de negócio PSS assistido por um programa PHM é uma atividade complexa que deve ser cuidadosamente analisada durante a fase de projeto do PSS estando, desse modo, fora do escopo deste trabalho.

Uma vez que o modelo de negócio PSS é estabelecido e um contrato de serviço é firmado entre as partes, o fornecedor PSS deve estar preparado para atender a novas solicitações do cliente. Devido a natureza dinâmica do mercado e ao longo prazo de duração dos contratos, solicitações que não foram previstas durante a fase de projeto do PSS (como extensão do contrato de serviços, aumento da disponibilidade dos ativos, dentre outras) podem ser feitas pelos clientes. Nesse contexto, o fornecedor PSS deve estar preparado para realizar tomada de decisões de cunho logístico e operacional no intuito de atender a novas necessidades sem desrespeitar, obviamente, os limites de desempenho previamente estabelecidos. Neste cenário, o suporte de um programa PHM se torna fundamental quando se deseja monitorar o desempenho individual de cada ativo e utilizar as informações monitoradas para atualizar os índices de desempenho. Isto foi devidamente comprovado a partir dos resultados obtidos com o estudo de caso 02.

Índices de desempenho em modelos de negócio PSS são diversos e podem variar de acordo com o contrato estabelecido entre as partes. Isto porque, um modelo de negócio PSS prioriza a co-criação de valores onde as necessidades de ambas as partes (isto é do cliente e do fornecedor) devem ser consideradas. No contexto da interação PSS-PHM, os índices de desempenho que se destacam são aqueles associados diretamente ao desempenho dos ativos. Por este motivo a disponibilidade operacional, utilização, MTBF, dentre outros, foram enfaticamente utilizados em todos os estudos de caso.

De fato, uma efetiva interação PSS-PHM requer necessariamente a utilização progressiva dos resultados obtidos de um programa PHM no modelo de negócio PSS. Todavia, na prática, isso esbarra na dificuldade de obter dados reais, atualizados e confiáveis. Esse é um dos grandes empecilhos relatados por Greenough & Grubic (2010) para validar as ferramentas MATHS e LIKEMATH por eles desenvolvidas. Essa dificuldade faz com que os projetistas de modelos de negócio PSS assistidos por um programa PHM realizem a modelagem de ativos utilizando uma série de suposições puramente teóricas, susceptíveis a erros e que não podem ser, na maioria dos casos, verificadas na prática. A segunda fase do estudo de caso 01 demonstrou este problema e a capacidade do *framework* em capturar variações de desempenho dos ativos e considerá-las na formulação dos resultados da simulação.

Ferramentas de modelagem e simulação têm sido comumente empregadas durante a fase de projeto do PSS (Phumbua & Tjahjono, 2011). Todavia, a dificuldade de se capturar dados reais faz com que a visibilidade do negócio, obtida a partir dos resultados da simulação, seja limitada principalmente quando a execução do PSS está sujeita a comportamentos dinâmicos. De fato, pouca ou nenhuma atenção tem sido dada a fase de execução do PSS (Mont, 2002). Isto faz do *framework* proposto uma poderosa ferramenta para promover a interação PSS-PHM. Os benefícios das simulações desenvolvidas com base no *framework* foram demonstrados em todos os estudos de caso.

A execução do PSS pode durar décadas dependendo das especialidades e das particularidades envolvidas no modelo de negócio. Conseqüentemente, é praticamente impossível prever todos os cenários possíveis durante a fase de projeto do PSS. Isto se torna ainda mais crítico quando ativos de alto valor agregado (*high-tech*) e garantias de alto desempenho devem ser consideradas no modelo de negócio. Sob estas condições é desejável que o fornecedor PSS tenha capacidade de reagir não só a circunstâncias não-previstas, mas também que seja capaz de reavaliar suas estratégias de negócio. Desenvolver simulações com base no *framework* proposto proporciona capacidade adicional de reação a circunstâncias não-previstas conforme demonstrado nos resultados de todos os estudos de caso.

8.2 - CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

8.2.1 - Contribuições da metodologia de pesquisa

Os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho constituem uma importante contribuição sob o ponto de vista da metodologia de pesquisa. Isto porque os resultados obtidos com a realização deste trabalho comprovaram a validade da metodologia proposta. A partir da análise minuciosa da literatura relevante foi possível obter cinco fundamentos associados ao tema de pesquisa proposto. Utilizando os fundamentos levantados e os resultados experimentais obtidos com os estudos de caso, as indagações levantadas no objetivo de pesquisa foram mais precisamente respondidas.

A descoberta da ausência e a justificativa devidamente fundamentada da necessidade de se desenvolver novas técnicas de modelagem e simulação constitui outra importante contribuição deste trabalho. Em particular, a utilização de simulações online para promover a interação PSS-PHM. Isto porque em uma simulação online, dados capturados são utilizados para atualizar a representação dos ativos na simulação. Em outras palavras, a medida que o modelo de negócio PSS é executado, o estado de saúde dos ativos pode ser capturado por um programa PHM e utilizados para auxiliar as tomadas de decisões no plano operacional do PSS. Esta afirmação foi devidamente comprovada em todos os estudos de caso realizados.

8.2.2 - Contribuições técnicas

O *framework* para a interação PSS-PHM constitui uma importante contribuição técnica desta pesquisa. Isto porque nenhum modelo ou método até então desenvolvido descreve sistematicamente como realizar a interação PSS-PHM. O *framework* proposto é considerado inédito ao descrever como incorporar as informações fornecidas por um programa PHM em um modelo de negócio PSS. A ausência de modelos e métodos de análise para a fase operacional do PSS tem dificultado e muito a migração para este modelo de negócio. Contudo, existe pouca ou quase nenhuma pesquisa sobre a interação PSS-PHM, ou até mesmo uma clara compreensão do valor adicional dado por esta interação tanto para o cliente quanto para o fornecedor (Greenough & Grubic, 2010).

Outra contribuição técnica não menos importante é o conceito e o projeto do módulo de estimação da confiabilidade (REM). Este módulo possui em seu *kernel* uma técnica de estimação estocástica que possibilita estimar o estado futuro de degradação de cada ativo com base nas informações fornecidas por um programa PHM. Nesse sentido, modelos e simulações desenvolvidas com base no *framework* se diferem dos modelos e das simulações tradicionais. Nos modelos e nas simulações tradicionais, as falhas dos ativos são sempre baseadas em dados históricos e em distribuições de probabilidade. Embora esta abordagem seja igualmente importante, ela não considera as influências que as condições operacionais e ambientais possuem sobre o tempo de vida dos ativos.

8.2.3 - Contribuições para ferramentas

Os artefatos concebidos neste trabalho englobam todos os componentes de simulação desenvolvidos e apresentados no capítulo 6. Utilizando os componentes apresentados é possível desenvolver simulações que podem ser utilizadas tanto no projeto do modelo de negócio PSS, como também na sua fase de execução. Dois dos elementos desenvolvidos merecem um destaque especial: o modelo de ativo personalizado (CAM) e o controlador de simulação online (OSE). O primeiro componente é utilizado para representar um ativo assistido por um programa PHM na simulação. Desse modo, simulações com CAMs são capazes de considerar os efeitos das condições ambientais e operacionais dos ativos nos resultados produzidos. Já o segundo componente gerencia a execução de uma simulação online. Ele fornece funções de um *real-time engine* e restringe o funcionamento do *simulation engine* da plataforma de desenvolvimento utilizada.

Outra importante contribuição para ferramentas é a implementação dos componentes de simulação em uma plataforma comercial (neste caso, o Anylogic). Apesar da dificuldade inicial em desenvolver novas funções que não estivessem sujeitas ao controle do *simulation engine* da plataforma, estas dificuldades foram totalmente compensadas pelos resultados de desenvolvimento alcançados. Em outras palavras, considerando o tempo de desenvolvimento disponível e a demanda por componentes de simulação, a utilização de uma plataforma comercial foi essencial para promover os resultados alcançados. Isto porque, complexos componentes de simulação foram desenvolvidos com base na reutilização de software e em

outros componentes fornecidos pela plataforma. Os protótipos de componentes implementados podem futuramente ser aprimorados e refinados para o desenvolvimento de uma biblioteca comercial.

8.3 - LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Com relação ao desenvolvimento da pesquisa, uma das principais limitações está associada com a quantidade de trabalhos especializados sobre o assunto. Embora seja notadamente reconhecida a importância da utilização de funções de diagnóstico e prognóstico para explorar novas oportunidades de negócio, a maior parte das investigações até o momento realizadas se limitam a investigar os modelos de negócio PSS e os programas PHM de forma separada e independente. De fato, uma reconhecida exceção a esta premissa é o trabalho desenvolvido por Greenough & Grubic (2011) que possivelmente é o primeiro trabalho realizado sobre o tema de pesquisa. Por este motivo, apesar de uma intensa pesquisa em diversas bases de dados (como o GoogleScholar, SCIRUS, ScienceDirect, dentre outras) e uma janela de tempo de 12 anos (de 2000 a 2012), apenas 14 trabalhos foram selecionados e catalogados na tabela 3.1.

Outra reconhecida limitação deste trabalho é a investigação sobre processos de análise e tomadas de decisões em modelos PSS. De fato, a tomada de decisão em modelos PSS é uma atividade complexa com múltiplos parâmetros de entrada e objetivos, muitas vezes, conflitantes. Por este motivo, as tomadas de decisões são tipicamente feitas manualmente por uma equipe de engenharia que configura um conjunto de premissas na simulação e avalia os resultados obtidos. Isto dificulta a proposição de módulos de tomada de decisão automáticos baseados em funções lógicas ou em técnicas de inteligência artificial (como sistemas especialistas, lógica fuzzy, etc.). Por este motivo, a análise e tomada de decisão automática foi feita apenas no terceiro estudo de caso, utilizando como técnica de otimização um algoritmo genético.

A ausência de um módulo PHM completo e validado também dificultou o desenvolvimento desta pesquisa. Mais informações sobre monitoramento condicional e de degradação dos ativos necessitam ser levantadas e utilizadas para validar o REM. Também é necessário implementar outras técnicas de estimação da confiabilidade, já que neste trabalho apenas a *exponential smoothing* foi testada. Outra limitação associada a esta pesquisa é a ausência de investigação sobre as estratégias de manutenção quando o ativo monitorado possuir um ou mais componentes críticos. Em todos os estudos de caso, considerou-se que os ativos monitorados possuíam apenas

um componente crítico. Outra limitação associada a esta pesquisa consiste na relação entre utilização e degradação dos ativos. Sabe-se que o processo de degradação é particular para cada componente crítico monitorado, sendo esta relação difícil de ser levantada na prática. Por este motivo, o *framework* desenvolvido considera que as informações de degradação estão disponíveis, sendo necessário configurar a representação dos ativos para cada componente crítico monitorado.

Por se tratar de um tema de pesquisa multidisciplinar, outra limitação desta pesquisa foi desenvolver um estudo de caso, com dados reais, que aplicasse todos os conceitos estabelecidos no *framework*. As poucas empresas que implementam uma solução PSS-PHM não se dispuseram a fornecer informações por considerá-las sigilosas. Além disso, as empresas selecionadas também não dispunham de todas as informações necessárias, sendo por este motivo realizado inferências para as informações ausentes. Esta mesma dificuldade já foi retratada por Greenough & Grubic (2011) para validar as ferramentas MATHS e LIKEMATH por eles desenvolvidas.

8.4 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o objetivo principal deste trabalho tenha sido alcançado é imprescindível listar algumas questões que necessitam ser mais investigadas. Em primeiro lugar é necessário realizar mais pesquisas sobre o tema proposto. Conforme verificado pela revisão da literatura, a quantidade de trabalhos especializados sobre o assunto é relativamente pequena sendo necessário então expandir a lista de referências. De fato, a maioria dos trabalhos correlacionados ao tema de pesquisa investiga os programas PHM somente do ponto de vista tecnológico, sem se preocupar com as novas oportunidades de negócio que podem ser geradas. Esta observação também vale para as investigações relacionadas aos modelos de negócio PSS que reconhecem a importância de um programa PHM, mas não especificam quantitativamente os possíveis ganhos de se investir nesta nova tecnologia. Contudo, esta necessidade de se expandir o estado da arte sobre o assunto também foi reconhecida por Greenough & Grubic (2011).

Outra importante sugestão é o desenvolvimento de uma interface de saída padronizada para os resultados de um programa PHM. Esta interface deve encapsular os detalhes técnicos do processo de degradação dos componentes críticos realizando transformações e normalizações nos resultados. Desse modo, independentemente do componente crítico monitorado e do modo

de falha que o mesmo estiver sujeito, será possível avaliar e comparar os resultados de um programa PHM de forma padronizada. Isto aumenta a confiabilidade dos resultados das simulações fazendo com que tomadas de decisão sejam realizadas de forma ainda mais precisas.

Implementar novos modelos de ativos personalizados (CAMs) também é sugerido. A versão do CAM apresentada neste trabalho pode representar apenas um componente crítico dificultando o desenvolvimento de uma simulação online para analisar diferentes estratégias de manutenção. Neste sentido é imprescindível desenvolver novas versões do CAM que suporte mais de um componente crítico. Esta mesma observação é aplicável para o *kernel* do REM. A versão atual implementa a técnica *exponential smoothing* que fornece somente uma estimação da tendência de degradação. Ao desenvolver novos *kernels* utilizando outras técnicas de estimação é possível aumentar ainda mais a precisão das estimativas obtidas.

O processo de análise e suporte a tomada de decisão em modelos de negócio PSS precisa ser mais sistematicamente investigado. Isto permitirá formalizar novos métodos e procedimentos que permitirão automatizar o processo decisório. De fato, a ausência destes métodos e procedimentos foi um dos grandes empecilhos para implementar novos ASDMs. Uma vez que novos métodos e procedimentos estiverem disponíveis será possível realizar tomadas de decisões automáticas. Por conseguinte, o usuário poderá definir um conjunto de premissas e as funções objetivos em um ADSM que utilizará os resultados da simulação para indicar a melhor decisão a ser considerada.

Por último, é necessário realizar mais estudos de caso utilizando o *framework* proposto. Novos estudos com fornecedores PSS que optarem por um modelo de negócio assistido por um programa PHM é particularmente desejado. Isto permitirá analisar qualitativamente quais ajustes devem ser realizados durante a execução do PSS, sendo estes ajustes primordiais para alinhar a solução oferecida pelo fornecedor com as necessidades dos clientes. Novas ofertas podem ser incluídas no pacote de serviços a partir desta análise. Também é desejado investigar, na prática, o retorno de investimento obtido com a implantação de um programa PHM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akturk, M. S., Ghosh, J. B. & Gunes, E. D. (2003). Scheduling with tool changes to minimize total completion time: A study of heuristics and their performance. *Naval Research Logistics (NRL)*. 50 (1) p. 15-30.
- Al-Najjara, B. & Alsyouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *Int. J. Production Economics*. 84 p. 85-100.
- Ammirati, S., Philip, R., Robles, F., Benkarski, J., Bohra, P., Callahan, J., Drew, M., Gangula, B., Harvey, M., Illinda, P., Powers, D., Raghavendran, S. & Sinha, A. (2012). *The Future of Manufacturing Opportunities to drive economic growth*. [Techincal Report]. Available at: <http://www.weforum.org/reports/future-manufacturing>. [Accessed: 08th Jul 2012].
- Anylogic (2011). *Anylogic Simulation Software and Services - Overview*. [Online]. Available at: <http://www.xjtek.com/anylogic/overview/>. [Accessed: 09th Dez 2011].
- Aurich, J., Fuchs, C. & Wagenknecht, C. (2006). Life cycle oriented design of technical Product-Service Systems. *Journal of Cleaner Production*. 14 (17) p. 1480 -1494.
- Azarenko, A., Roy, R., Shehab, E. & Tiwari, A. (2009). Technical product-service systems: some implications for the machine tool industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20 p. 700-722.
- Baines, T., Lightfoot, H. & Kay, J. (2009). Servitized manufacture: Practical challenges of delivering integrated products and services. *IJMechE Part B*. 223 (1-9) p. 1207-1215.
- Baines, T. S., Lightfoot, H. W., Benedettini, O. & Kay, J. M. (2009a). The servitization of manufacturing: A review of literature and reflection on future challenges. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20 (5) p. 547-567.
- Baines, T. S., Lightfoot, H. W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., Shehab, E., Braganza, A., Tiwari, A., Alcock, J. R., Angus, J. P., Bastl, M., Cousens, A., Irving, P., Johnson, M., Kingston, J., Lockett, H., Martinez, V., Michele, P., Tranfield, D., Walton, I. W. & Wilson, H. (2007). State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 221 (10) p. 1543-1552.
- Banjevic, D. (2009). Remaining useful life in theory and practice. *Metrika*. 69 p. 337-349.
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. & Nicol, B. M. (2009). *Discrete-event system simulation*. 5th Ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall

- Banks, J., Reichard, K., Crow, E. & Nickell, E. (2005). How engineers can conduct cost-benefit analysis for PHM systems. *In Aerospace Conference, 2005 IEEE*. pp. 3958-3967.
- Benedettini, O., Baines, T. S., Lightfoot, H. & Greenough, R. M. (2009). State-of-the-art in integrated vehicle health management. 223 p. 157-170.
- Benedettini, O. & Tjahjono, B. (2009). Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 43 p. 191-199.
- Berkowitz, D., Gupta, J.N., Simpson, J.T. & McWilliams, J.B. (2005). Defining and implementing Performance-Based Logistics in government. *Defense Acquisition Review Journal*. 11 (3) p. 255-267.
- Brennan, R. (2007). Toward Real-Time Distributed Intelligent Control: A Survey of Research Themes and Applications. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*. 37 (5) p. 744 -765.
- Brown, D. W., Kalgren, P. W., Byington, C. S. & Roemer, M. J. (2007). Electronic prognostics – A case study using global positioning system (GPS). *Microelectronics Reliability*. 47 (12) p. 1874 -1881.
- Byington, C. S. & Roemer, M. J. (2009). Selected Prognostic Methods with Application to an Integrated Health Management System. In: Valavanis, K. P. (ed.). *Selected Prognostic Methods with Application to an Integrated Health Management System*. : Springer Netherlands p. 3-21.
- Caesarendra, W., Niu, G. & Yang, B. (2010). Machine condition prognosis based on sequential Monte Carlo method. *Expert Systems with Applications*. 37 p. 2412-2420.
- Cheng, S., Azarian, M. H. & Pecht, M. G. (2010). Sensor Systems for Prognostics and Health Management. *Sensors*. 10 (6) p. 5774-5797.
- Colen, P. & Lambrecht, M. (2010). Product Service Systems: Exploring Service Operations Strategies. *In International Conference on Information systems, Logistics and Supply Chain*. K.U.Leuven - Faculty of Business and Economics. pp. 1-16.
- Cook, M. B., Bhamra, T. & Lemon, M. (2006). The transfer and application of Product Service Systems: from academia to UK manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*. 14 (17) p. 1455-1465.
- Da Silva, C. M. I., Cabrita, Carlos, M. P. & Matias, J. C. O. (2008). Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 14 (4) p. 343 - 355.

- Daigle, M. & Goebel, K. (2010). Model-based prognostics under limited sensing. *In Aerospace Conference, 2010 IEEE*. pp. 1-12.
- DECOMTEC (2012). *Competitividade da Indústria Manufatureira - Brasil e Países Selecionados*. [Technical report]. Available at: <http://www2.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=1874>. [Accessed: 13th Ago 2012].
- Deloitte (2010). *2010 Global Manufacturing Competitiveness Index*. [Technical Report]. Available at: http://www.compete.org/images/uploads/File/PDF%20Files/2010_Global_Manufacturing_Competitiveness_Index_FINAL.pdf. [Accessed: 09th Aug 2012].
- DTI (2007). *Innovation in Services*. [Online]. Available from: <http://www.dti.gov.uk/files/file39965.pdf>. [Accessed: 08th Jul 2012].
- Feldman, K., Jazouli, T. & Sandborn, P. A. (2009). A methodology for determining the return on investment associated with prognostics and health management. *IEEE Transactions on Reliability*. 58 (2) p. 305-316.
- Fleischer, J. & Nesges, D. (2006). Identifying availability contribution of lifecycle-adapted services. In: Brissaud, D., Tichkiewitch, S. & Zwolinski, P. (ed.). *Identifying availability contribution of lifecycle-adapted services*. Netherlands: Springer p. 209-222.
- Fleischer, J., Weismann, U. & Nigggeschmidt, S. (2006). Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements. *In Proceedings of LCE*.
- Flexim (2012). *Flexsim Simulation Software - Overview*. [Online]. Available at: <http://www.flexsim.com/flexsim/>. [Accessed: 06th Jun 2012].
- FMIIC (2011). *Trends in manufacturing to 2020 - A foresighting discussion paper*. [Technical report]. Available at: <http://www.innovation.gov.au/Industry/FutureManufacturing/FMIIC/Documents/TrendsinManufacturingto2020.pdf>. [Accessed: 09th Ago 2012].
- Forfás (2006). *The Changing Nature of Manufacturing and Services Irish Trends and International Context*. [Technical report]. Available at: http://www.forfas.ie/media/forfas060718_changing_nature_manufacturing_full_report.pdf. [Accessed: 13th Ago 2012].
- Gansler, J. S. & Lucyshyn, W. (2006). Evaluation of Performance Based Logistics. [Technical Report]. University of Maryland and Naval Postgraduate School. UMD-LM-06-040.
- Gelper, S., Fried, R. & Croux, C. (2010). Robust forecasting with exponential and Holt-Winters smoothing. *Journal of Forecasting*. 29 (3) p. 285-300.
- Genero, M., Manso, E., Visaggio, A., Canfora, G. & Piattini, M. (2007). Building measure-based prediction models for UML class diagram maintainability. *Empirical Software Engineering*. 12 p. 517-549.

- Geyer, A., Scapolo, F., Boden, M., Döry, T. & Ducatel, K. (2003). *The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020 - The Challenge for Sustainability*. [Technical report]. Available at: <http://foresight.jrc.ec.europa.eu/documents/eur20705en.pdf>. [Accessed: 13th Ago 2012].
- Ghosh, N., Ravi, Y., Patra, A., Mukhopadhyay, S., Paul, S., Mohanty, A. & Chattopadhyay, A. (2007). Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 21 p. 466–479.
- Goffin, K. & New, C. (2001). Customer support and new product development - An exploratory study. *International Journal of Operations & Production Management*. 21 (3) p. 275-301.
- Greenough, R. M. & Grubic, T. (2011). Modelling condition-based maintenance to deliver a service to machine tool users. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 52 (9) p. 1117-1132.
- Grubic, T., Jennions, I. & Baines, T. (2009). The Interaction of PSS and PHM - a mutual benefit case. *In Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*.
- Grubic, T., Redding, L., Baines, T. & Julien, D. (2011). The adoption and use of diagnostic and prognostic technology within UK-based manufacturers. *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*. 225.
- Guajardo, J. A., Cohen, M. A., Kim, S. & Netessine, S. (2011). Impact of Performance-Based Contracting on Product Reliability: An Empirical Analysis. *INSEAD Working Paper No. 2011/49/TOM*.
- Hamada, M. S., Wilson, A. G., Reese, C. S. & Martz, H. F. (2008). *Bayesian Reliability*: Springer New York
- Hanisch, A., Tolujew, J. & Schulze, T. (2005). Initialization of online simulation models. *In Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter*. pp. 9.
- Hess, A. (2002). The Prognostic Requirement for Advanced Sensors and Non-Traditional Detection Technologies. *In DARPA/DSO Prognosis Bidder's Conference*.
- IFM & IBM (2008). *Succeeding through service innovation - A service perspective for education, research, business and government*. University of Cambridge Institute for Manufacturing
- Ilgin, M. A. & Gupta, S. M. (2010). Use of sensor embedded products for end of life processing. *In B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hagan & E. Yücesan, ed., Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*.

- Ingemansson, A., Bolmsjö, G. & Harlin, U. (2002). A Survey of the Use of the Discrete-Event Simulation in Manufacturing Industry. *In Proceedings of the 10th International Manufacturing Conference.*
- INSEAD (2012). *The Global Innovation Index 2011 - Accelerating Growth and Development.* [Technical report]. Available at: http://www.globalinnovationindex.org/gii/main/previous/2010-11/FullReport_10-11.pdf. [Accessed: 10th Aug 2012]
- InterfaceFLOR (2011). *The Environmental Product Declaration: Convert Design Product Platform.* [Online]. Available at: http://www.thegreenstandard.org/documents/InterfaceFlorAmericasConvertN66EPDJuly262010_C_.pdf. [Accessed: 06th Nov 2011].
- Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control.* 29 p. 71-85.
- Iyer, N., Goebel, K. & Bonissone, P. (2006). Framework for Post-Prognostic Decision Support. *In 2006 IEEE on Aerospace Conference.* pp. 10.
- Jardine, A. K. S., Lin, D. & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 20 p. 1483-1510.
- Jazouli, T. & Sandborn, P. (2010). A Design for Availability Approach for Use with PHM. *In Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society.*
- Junior, S. K., Porto, G. S. & Pazello, E. T. (2004). Inovação na indústria brasileira: uma análise exploratória a partir do PINTEC. *Revista Brasileira de Inovação.* 3 (1) p. 87-128.
- Kahtalian, M. (2002). Marketing de Serviços. *Coleção gestão empresarial.* 3 p. 19-29.
- Khalak, A. & Tierno, J. (2006). Influence of Prognostic Health Management on Logistic Supply Chain. *In Proceedings of the 2006 American Control Conference.*
- Kim, Y., Wang, E., Lee, S. & Cho, Y. (2009). A Product-Service System Representation and Its Application in a Concept Design Scenario. *In Proceedings of the 1st CIRP Industrial Product-Service Systems (IPS2) Conference.* pp. 32.
- Kothamasu, R. & Huang, S. H. (2007). Adaptive Mamdani fuzzy model for condition-based maintenance. *Fuzzy Sets and Systems.* 158 p. 2715-2733.
- Lamond, B. F. & Sodhi, M. S. (2006). Minimizing the expected processing time on a flexible machine with random tool lives. *IIE Transactions.* 38 (1) p. 1-11.

- LaViola, J. J. (2003). Double exponential smoothing: an alternative to Kalman filter-based predictive tracking. *In Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003*. ACM. New York, NY, USA. pp. 199-206.
- Lee, J., Chen, Y., Al-Atat, H., AbuAli, M. & Lapira, E. (2009). A systematic approach for predictive maintenance service design: methodology and applications. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*. 2 (1) p. 76 - 94.
- Lee, Y. K. (2008). *A fault diagnosis technique for complex systems using Bayesian data analysis*. PhD thesis. Academic Faculty - Georgia Institute of Technology.
- Lightfoot, H. W., Baines, T. & Smart, P. (2011). Examining the information and communication technologies enabling servitized manufacture. *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*. 225 (10) p. 1964-1968.
- Lindahl, M., Sundin, E., Sakao, T. & Shimomura, Y. (2005). An Application of a Service Design Tool at a Global Warehouse Provider. *In Proceedings of International Conference on Engineering Design (ICED- 05)*. pp. 469-470.
- Lu, H., Kolarik, W. J. & Lu, S. S. (2001). Real-Time Performance Reliability Prediction. *IEEE Transactions on reliability*. 50 (4).
- Lu, S., Lu, H. & Kolarik, W. (2001a). Multivariate performance reliability prediction in real-time. *Reliability Engineering and System Safety*. 72 (1) p. 39-45.
- Lu, S., Tu, Y. & Lu, H. (2007). Predictive Condition-based Maintenance for Continuously Deteriorating Systems. *Quality and Reliability Engineering International*. 23 p. 71-81.
- Macdonald, E., Martinez, V. & Wilson, H. (2009). Towards the assessment of the value-in- use of product-service systems: A review. *In Performance Management Association Conference, New Zealand*.
- Malley, M. E. (2001). *A methodology for Simulating the Joint Strike Fighter's (JSF) Prognostic and Health Management System*. Master's thesis. Department of the Air Force, Air University, Air Force Institute of Technology.
- Markeset, T. & Kumar, U. (2003). Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 9 (4) p. 376-392.
- Markou, C. & Cros, G. (2012). Airline Maintenance Cost Executive Commentary - An Exclusive Benchmark Analysis. [Technical report]. Available at: http://www.iata.org/workgroups/Documents/MCTF/AMC_ExecComment_FY09.pdf. [Accessed: 13th Ago 1012].

- Meier, H., Roy, R. & Seliger, G. (2010). Industrial Product-Service Systems-IPS2. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 59 (2) p. 607 - 627.
- Mingers, J. & Brocklesby, J. (1997). Multimethodology: Towards a framework for mixing methodologies. *International Journal of Management Science*. 25 (5) p. 459-501.
- Mirdamadi, S., Fontanili, F. & Dupont, L. (2007). Discrete event simulation-based real-time shop floor control. In *ECMS'07, 21st European Conference on Modelling and Simulation*.
- Mont, O. K. (2002). Clarifying the concept of product-service system. *Journal of Cleaner Production*. 10 (3) p. 237-245.
- Morelli, N. (2006). Developing new product service systems (PSS): methodologies and operational tools. *Journal of Cleaner Production*. 14 (17) p. 1495 -1501.
- Moubray, J. (1997). *Reliability centered maintenance*. 2nd ed. Ed.: Industrial Press Inc, New York, EUA
- Muller, A., Suhner, M. C. & Iung, B. (2008). Formalization of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. *Reliability Engineering and System Safety*. 93 p. 234-253.
- NASA (2012). *Humans in Space - Integrated Vehicle Health Management (IVHM)*. [Online]. Available at: <http://www.nasa.gov/centers/ames/research/humaninspace/humansinspace-ivhm.html>. [Accessed: 12th Feb 2012]
- NASA (2012a). *Prognostics Data Repository*. [Online]. Available at: <http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository/>. [Accessed: 06th Jul 2012].
- Neely, A. (2007). The servitization of manufacturing: an analysis of global trends. *Operations Management*. p. 1-10.
- Neely, A. (2008). Exploring the financial consequences of the servitization of manufacturing. *Operations Management Research*. 1 p. 103-118.
- NIST/SEMATECH (2011). *e-Handbook of Statistical Methods*. [Online]. Available at: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Accessed: 14th Jan 2011].
- OECD (2012). *Innovation for Development - A discussion of the issues and an overview of work of the OECD directorate for science, technology and industry*. [Technical report]. Available at: <http://www.oecd.org/sti/innovationinsciencetechnologyandindustry/50586251.pdf>. [Accessed: 13th Ago 2012].
- OECD (2012a). *Glossary of Statistical Terms*. [Online]. Available at: <http://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1184>. [Accessed: 10th Aug 2012].

- Ogata, K. (2001). *Modern Control Engineering*: Prentice Hall PTR
- Oliva, R. & Kallenberg, R. (2003). Managing the transition from products to services. *International Journal of Service Industry Management*. 12 (2) p. 160-172.
- Ondemir, O. & Gupta, S. M. (2009). *Cost-benefit analysis of sensor-embedded products based disassembly-to-order system*. [Online]. Available at: <http://hdl.handle.net/2047/d20000261>. [Accessed: 09th Ago 2012].
- Ouertani, M. Z., Parlikad, A. K. & Mcfarlane, D. (2008). Towards an approach to select an asset information management strategy. *International Journal of Computer Science and Applications*. 5 p. 25-44.
- Palanisamy, P., Rajendran, I. & Shanmugasundaram, S. (2008). Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 37 p. 29-41.
- Parkersell (2011). *Added value through innovative product-service offers: the Parkersell case study*. [Online]. Available at: http://www.mepss.nl/files/MEPSS_Parkersell_Case_Study_Final.v22.pdf. [Accessed: 06th Nov 2011].
- PDP (2008). *Política de Desenvolvimento Produtivo - Inovar e investir para sustentar o crescimento*. [Technical report]. Available at: <http://www.mdic.gov.br/pdp/arquivos/destswf1212175349.pdf>. [Accessed: 09th Aug 2012].
- Pecht, M. & Jaai, R. (2010). A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems. *Microelectronics Reliability*. 50 (3) p. 317 - 323.
- Pecht, M. G. (2008). *Prognostics and Health Management of Electronics*: John Wiley & Sons, Inc
- Peng, Y., Dong, M. & Zuo, M. J. (2010). Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 50 (1-4) p. 297-313.
- Phumbua, S. & Tjahjono, B. (2011). Towards product-service systems modelling: a quest for dynamic behaviour and model parameters. *International Journal of Production Research*. p. 1-18.
- Phumbua, S. & Tjahjono, B. (2011a). Simulation Modelling of Availability Contracts. *In 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- PINTEC (2008). *Pesquisa de Inovação Tecnológica*: IBGE - Coordenação de Indústria.

- Prochnik, V. & Araújo, R. D. (2005). Uma análise do baixo grau de inovação na indústria brasileira a partir do estudo de firmas menos inovadoras. In: De Negri, S. (eds). *Inovações, padrões tecnológicos e desempenho das firmas industriais brasileiras*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- Qiu, H., Lee, J., Lin, J. & Yu, G. (2006). Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics. *Journal of Sound and Vibration*. 289 p. 1066–1090.
- Rausand, M. & Hoyland, A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. 2nd Ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience
- Redding, L. (2009). Integrated Vehicle Health Management (IVHM): An enabler to the ‘servitization’ of products within the UK manufacturing sector – a model approach. In *Doctoral Consortium - Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society San Diego, USA Sept 28th – Oct 1st*.
- Rockwell (2012). *Arena Simulation Software*. [Online]. Available at: http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx. [Accessed: 13th Ago 2012].
- Roemer, M. J., Byington, C. B., Kacprzynski, G. J. & Vachtsevanos, G. (2005). An Overview of Selected Prognostic Technologies with Reference to an Integrated PHM Architecture. In *Proceedings of the First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace*.
- Rolls-Royce (2010). *Total Care as a flexible approach to achieve and engine support service*. [Online]. Available at: <http://www.rolls-royce.com/civil/services/totalcare/>. [Accessed: 23th Nov 2010].
- Salerno, M. S. (2004). A política industrial, tecnológica e de comércio exterior do governo federal. *Parcerias estratégicas*. (19) p. 13-35.
- Sandborn, P. A. & Wilkinson, C. (2007). A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management (PHM) to electronic systems. *Microelectronics Reliability*. 47 (12) p. 1889-1901.
- Sargent, R. G. (2009). Verification and validation of simulation models. In M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin & R. G. Ingalls, ed., *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*.
- Saxena, A., Celaya, J., Balaban, E., Goebel, K., Saha, B., Saha, S. & Schwabacher, M. (2008), Metrics for Evaluating Performance of Prognostic Techniques. In *International Conference on Prognostics and Health Management*.

- Saxena, A.; Celaya, J.; Saha, B.; Saha, S. & Goebel, K. (2009). On Applying the Prognostic Performance Metrics. *In Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*.
- Scanff, E., Feldman, K. L., Ghelam, S., Sandborn, P., Glade, M. & Foucher, B. (2007). Life Cycle Cost Impact of Using Prognostic Health Management (PHM) for Helicopter Avionics. *Microelectronics Reliability*. 47 (12) p. 1857-1864.
- Schwabacher, M., Samuelsa, J. & Brownstonb, L. (2002). The NASA Integrated Vehicle Health Management technology experiment for X-37. *In Proceedings of the SPIE AeroSense*.
- Sheehan, J. (2006). Understanding service sector innovation. *Communications of the ACM*. 49 (7) p. 42-47.
- Shen, T., Wan, F., Cui, W. & Song, B. (2010). Application of Prognostic and Health Management technology on aircraft fuel system. *In Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM '10*. pp. 1 -7.
- Slack, N. (2005). Operations strategy: will it ever realize its potential?. *Gestão & Produção*. 12 p. 323 - 332.
- Song, L., Ramos, F. & Arnold, K. (2008). A framework for real-time simulation of heavy construction operations. *In Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. pp. 2387-2395.
- Spring, M. & Araujo, L. (2009). Service, services and products: rethinking operations strategy. *International Journal of Operations & Production Management*. 29 p. 444-467.
- Sun, B., Zeng, S., Kang, R. & Pecht, M. (2010). Benefits Analysis of Prognostics in Systems. *In Prognostics & System Health Management Conference*.
- Sundin, E. (2009). Life-Cycle Perspectives of Product/Service- Systems: In Design Theory. In: Sakao, T. & Lindahl, M. (eds). *Introduction to Product/Service-System Design*. London: Springer-Verlag
- Sundin, E. & Bras, B. (2005). Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 13 (9) p. 913 - 925.
- Sundin, E., Sandström, G. Ö., Lindahl, M. & Rönnbäck, A. Ö. (2009). Using Company–Academia Networks for Improving Product/Service Systems at Large Companies. In: Sakao, T. & Lindahl, M. (eds). *Introduction to Product/Service-System Design*. London: Springer-Verlag

- Tamura, S., Sheehan, J., Martinez, C. & Kergroach, S. (2005). Promoting innovation in services. In: for Economic Co-operation, O. & Development (eds). *Enhancing the Performance of the Service Sector*. OECD Publishing
- Tan, A., McAlloone, T. & Matzen, D. (2009). Service-Oriented Strategies for Manufacturing Firms. In: Sakao, T. & Lindahl, M. (eds). *Introduction to Product/Service-System Design*. Springer
- Teixeira, E. L. S., Tjahjono, B., Alfaro, S. C. A. & Julião, J. M. S. (2013). Harnessing Prognostics Health Management and Product-Service Systems interaction to support operational decisions. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 24 (1).
- Teixeira, E. L. S., Tjahjono, B. & Alfaro, S. C. A. (2012). A novel framework to link Prognostics and Health Management and Product-Service Systems using online simulation. *Computers in Industry*. 63 (7) p. 669-679.
- Tjahjono, B. & Ladbrook, J. (2011). Simulation modeling of tool delivery system in a machining line. In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*.
- Torell, W. & Avelar, V. (2011). *Mean Time Between Failure: Explanation and Standards*. [Online]. Available at: www.ptsdcs.com/whitepapers/57.pdf. [Accessed: 12th May 2011].
- Tran, V. T., Yang, B., Oh, M. & Tan, A. C. C. (2008). Machine condition prognosis based on regression trees and one-step-ahead prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 22 p. 1179-1193.
- Tu, F., Ghoshal, S., Luo, J., Biswas, G., Mahadevan, S., Jaw, L. & Navarra, K. (2007). PHM Integration with Maintenance and Inventory Management Systems. In *Aerospace Conference, 2007 IEEE*. pp. 1 -12.
- Tukker, A. (2004). Eight types of Product-Service System: Eight ways to sustainability? experiences from suspronet. *Business Strategy and the Environment*. 13 p. 246-260.
- Tukker, A. & Tischner, U. (2006). Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. *Journal of Cleaner Production*. 14 p. 1552-1556.
- Uckun, S., Goebel, K. & Lucas, P. (2008). Standardizing research methods for prognostics. In *Prognostics and Health Management, 2008. PHM 2008. International Conference on*. pp. 1 -10.
- Vachtsevanos, C., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A. & Wu, B. (2006). *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems* Hoboken, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K. & Kavuri, S. N. (2003). A review of process

- fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*. 27 p. 293-311.
- Waeyenbergh, G. & Pintelon, L. (2004). Maintenance concept development: A case study. *International Journal of Production Economics*. 89 (3) p. 395 - 405.
- Wang, W. Q., Golnaraghi, M. F. & Ismail, F. (2004). Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 18 p. 813-831.
- Williams, A. (2007). Product service systems in the automobile industry: contribution to system innovation?. *Journal of Cleaner Production*. 15 p. 1093 -1103.
- Williams, Z. (2006). Benefits of IVHM: An Analytical Approach. *In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*.
- Wynn, M. T., Dumas, M., Fidge, C. J., ter Hofstede, A. H. M. & van der Aalst, W. M. P. (2008). Business Process Simulation for Operational Decision Support. *Lecture Notes in Computer Science*. (4928) p. 66-77.
- Xu, Z., Ji, Y. & Zhou, D. (2009). Real-time reliability prediction for dynamic systems with both deteriorating and unreliable components. *Science in China Series F: Information Sciences*. 52 (11) p. 2234-2246.
- Yam, R. C. M., Tse, P., Li, L. & Tu, P. (2001). Intelligent Predictive Decision Support System for Condition-Based Maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 17 p. 383-391.
- Yang, X., Moore, P., Pu, J. & Wong, C. (2009). A practical methodology for realizing product service systems for consumer products. *Computers & Industrial Engineering*. 56 (1) p. 224 - 235.
- Yar, M. & Chatfield, C. (1990). Prediction intervals for the Holt-Winters forecasting procedure. *International Journal of Forecasting*. 6 (1) p. 127-137.
- Zhang, B., Sconyers, C., Byington, C., Patrick, R., Orchard, M. E. & Vachtsevanos, G. (2011). A Probabilistic Fault Detection Approach: Application to Bearing Fault Detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58 (5) p. 2011-2018.
- Zhu, H., Gao, J., Li, D. & Tang, D. (2012). A Web-based Product Service System for aerospace maintenance, repair and overhaul services. *Computers in Industry*. 63 (4) p. 338-348.
- Zhu, Q., Jiang, P., Huang, G. & Qu, T. (2011). Implementing an industrial product-service system for CNC machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 52 p. 1133-1147.
- Zuboff, S. (1988). *In the age of the smart machine: the future of work and power*. New York, NY, USA: Basic Books, Inc.