

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANÚBIA BUENO ESPÍNDOLA

**UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELO PARA
INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS DADOS DE
SISTEMAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE ATRAVÉS
DO USO DE TÉCNICAS DE REALIDADE MISTA**

Porto Alegre

2011

DANÚBIA BUENO ESPÍNDOLA

**UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELO PARA
INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS DADOS DE
SISTEMAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE ATRAVÉS
DO USO DE TÉCNICAS DE REALIDADE MISTA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre

2011

DANÚBIA BUENO ESPÍNDOLA

**UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELO PARA
INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS DADOS DE
SISTEMAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE ATRAVÉS
DO USO DE TÉCNICAS DE REALIDADE MISTA**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Technische Universitat Stuttgart, Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José António Barata de Oliveira, UNINOVA

Doutor pela Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Prof. Dr. Silvia Silva da Costa Botelho, FURG

Doutor pela Centre National de la Recherche Scientifique - LAAS, Toulouse, França.

Prof. Dr. Marcelo Gotz, UFRGS

Doutor pela Universität Paderborn, Paderborn, Alemanha.

Prof. Dr. Walter Fetter Lages, UFRGS

Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, junho de 2011.

DEDICATÓRIA

À Shri Mataji Nirmala Devi.

Alice: "Vorresti dirmi che strada devo prendere, per favore?"

Gatto: "Dipende da dove vuoi andare"

A: "Dove, non mi importa molto [...] purché arrivi in qualche posto"

G: "Per questo puoi stare tranquilla basta che non ti stanchi di camminare"

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Shri Mataji pela energia que me conduziu em cada momento, por sincronizar os acontecimentos de forma tão espontânea parecendo estar tudo escrito... que durante todas as minhas inseguranças me mostrava que sou meu mestre, me fazendo silenciosamente desconectar, me deixando tranqüila e confiante de que tudo é... como tem que ser.

Aos meus pais, sem a base de minha família não haveria chegado tão longe, obrigado pelo suporte, apoio, compreensão pelos meus muitos silêncios, cansaços e ausências com a família. Sem minhas irmãs (Dandara e Danusa) e meus pais (Angela e João Carlos) não haveria o sentido que há.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, por todas as oportunidades. A Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Centro de Ciências Computacionais (C3) e a Secretaria de Educação a Distância (SEaD), pelo auxílio nesta reta final e por constituírem toda a minha base. À CAPES e CNPQ pela provisão da bolsa de doutorado. A Universidade Politecnica di Milano (POLIMI), em especial Marco Garetti e Luca Fumagalli pela cooperação, apoio e discussões durante o estágio técnico, projetos e eventos em que participamos juntos. Aos colegas da FURG em especial (Ivete Pinto, Nelson Duarte, Silvia Botelho, Marisa Musa, Débora Laurino, Karina Machado e Alessandro Bicho) e PPGEE (Janice Oliveira, Miriam Rosek, Renato Bayan e Eduardo Schneider) pelo apoio nas infinitas tarefas desenvolvidas durante este trabalho.

Por fim e em especial, agradeço ao meu orientador Carlos, a quem admiro imensamente pelo profissionalismo, competência e multiparalelismo ;-), agradeço pelos ensinamentos, pela confiança e por me jogar na arena tantas vezes, me fazendo descobrir que era capaz de encarar tantos desafios. Não foram só conceitos teóricos, práticos, foram muito mais... lições de profissionalismo, ética, responsabilidade e persistência que me tornaram mais forte e que levarei como lição para a vida toda.... Com Carlos aprendi também a linguagem dos sinais, os puxões de orelha vinham na ausência do “um abraço” ao fim dos emails, foram poucos, mas significativos, me fizeram crescer e entender o que era a excelência tão pregada na UFRGS como ele sempre dizia. Obrigado Carlos.

RESUMO

A manutenção industrial é um dos grandes desafios na área de automação e manufatura da indústria. Este desafio tem se apresentado, em âmbito nacional, pela adoção da prática “predizer e prevenir” ao invés de “falhar e consertar”. Enquanto o Brasil caminha para uma mudança de paradigma de manutenção, o cenário internacional se volta para soluções em manufatura sustentável que atendam aos requisitos “*eco and green*”. E a manutenção é parte crucial deste novo contexto de produção. Entretanto, somente nos anos noventa, a indústria europeia começa a delinear estratégias de manutenção. A complexidade e multidisciplinaridade deste tema tem sido o principal obstáculo para melhoras substanciais na disciplina de manutenção. São nas estratégias de manutenção, aliadas ao crescente avanço em Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), que aparecem as possibilidades de superar as limitações e os desafios desta área de pesquisa. A Manutenção Inteligente (MI) é uma dessas estratégias e utiliza o paradigma baseado em condição (*Condition-based maintenance*) para aplicação da técnica “predizer e prevenir”. Contudo, uma das principais barreiras na adoção de MI é a sua transferência efetiva para o operador em chão de fábrica. O conhecimento gerado pelos sistemas MI deve ser transformado em informações inteligíveis e úteis para o operador. Entretanto, o acesso, o entendimento e o uso destes dados, durante a atividade de manutenção, não é um processo trivial, devido à sobrecarga de informações e sistemas envolvidos nestes processos. Surge, então, como alternativa para contornar este problema, o uso de técnicas de realidade mista como meio de potencializar a interface homem-máquina. A escolha, neste trabalho, por interfaces mistas, objetiva, não apenas a visualização, mas a integração e o gerenciamento da informação. A fim de alcançar estes objetivos, é desenvolvida uma abordagem baseada em modelo. A primeira etapa consiste na definição de um modelo conceitual que integre os diferentes domínios envolvidos na solução proposta. Nesta fase, foram identificadas três áreas da manutenção em que a realidade mista pode permitir um ganho significativo: diagnóstico, planejamento e segurança. A segunda etapa consiste na descrição formal de um modelo de dados para integrar e gerenciar informações de diversos formatos. Finalmente, é implementado um sistema de visualização para validar o modelo de dados em um conjunto de estudos de caso da indústria. Objetiva-se, com esta abordagem: (i) facilitar a identificação de quais componentes apresentam problemas, o que auxilia no processo de tomada de decisão nas tarefas de manutenção; (ii) a inclusão do *human in the loop*, com o sistema MI, em que o operador poderá solicitar dados e medições adicionais durante a atividade de manutenção; (iii) fornecer um modelo que integre dados de formatos distintos, que viabilize uma maneira fácil e flexível de configurar o ambiente virtual. A visualização mista, utilizada pelo operador de manutenção em chão de fábrica, pode representar uma vantagem competitiva para indústria, além de prover uma maior flexibilidade e segurança para o operador durante a atividade de manutenção.

Palavras-chaves: Realidade Aumentada/Mista. Gerenciamento da informação. Manutenção Inteligente.

ABSTRACT

Industrial maintenance is one of the major challenges in industrial automation and manufacturing area. This challenge presents itself on the national context by the transformation to "predict and prevent" rather than "fail and fix ". While the Brazil moves toward a paradigm shift of maintenance, the international context searches manufacturing sustainable solutions that reply according to eco and green requirements and the maintenance is crucial part of this new production environment. However, it was only in the nineties that European industry started discusses maintenance strategies. The maintenance complexity and the multidisciplinary have been the main limitations for substantial improvements in the maintenance discipline. There are maintenance strategies coupled with the advances in *Information and Communication Technologies (ICT)* that arise the possibilities to overcome the limitations and challenges of this research area. The intelligent maintenance (IM) is one of these strategies and it uses the *Condition-Based Maintenance* paradigm (CBM). On the other hand one of the obstacles about the IM adoption is its effective transfer to the operator on the factory floor. The knowledge from IM systems must be transformed in understandable information and useful to the operator. However, the access, the understanding and the use of such information during the maintenance activity are not a trivial activity due the data and systems overload involved in these processes. Thus, arises as an alternative to solve this problem, the using mixed reality techniques to human-computer interface. The use of mixed interfaces in this thesis will aim not only to visualization but the integration and management of information. To achieve these goals was developed a model-based approach. The first step consisted in defining a conceptual model that address the domains involved in the solution proposed. At this stage were identified three main areas where the mixed reality could allow a significant change to maintenance activities: diagnosis, planning and security. The second step consisted in the formal description of a data model for integrating and management of information from multiple formats. Finally a visualization system was implemented to validate the data model in a set of case studies of industry. The goals of this thesis are: (i) to facilitate the identification of which components present problems in order to help in the decision making process of the maintenance tasks; (ii) the inclusion of the "*human in the loop*" into intelligent maintenance system, where the operator can request measurements and additional information during the maintenance process; (iii) to supply a model to integrate data of different formats making available an easy and flexible tool for configuring the virtual environment. The mixed reality, used by the maintenance operator on factory floor, may represent a competitive advantage for industry and provide greater flexibility and safety for operator during maintenance activity.

Keywords: Augmented/Mixed Reality, Knowledge Management, Intelligent Maintenance System.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO..... | 12 |
| 1.2 | CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA..... | 13 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 22 |
| 1.3.1 | OBJETIVO GERAL | 22 |
| 1.3.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DA TESE | 23 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 25 |
| 2.1 | A MANUTENÇÃO..... | 25 |
| 2.2 | MANUTENÇÃO INTELIGENTE..... | 29 |
| 2.2.1 | FERRAMENTAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE..... | 33 |
| 2.3 | REALIDADE MISTA | 43 |
| 2.4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 50 |
| 3 | TRABALHOS RELACIONADOS..... | 52 |
| 3.1 | O USO DE RM EM MANUTENÇÃO..... | 52 |
| 3.2 | A RM NO GERENCIAMENTO DE DIFERENTES MODELOS DE DADOS ... | 59 |
| 3.3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 61 |
| 4 | A METODOLOGIA | 62 |
| 4.1 | ETAPA 1: MODELAGEM..... | 63 |
| 4.2 | ETAPA 2: INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO..... | 66 |
| 4.3 | ETAPA 3: VISUALIZAÇÃO | 68 |
| 4.4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 71 |
| 5 | A ABORDAGEM..... | 72 |
| 5.1 | O MODELO CONCEITUAL..... | 72 |
| 5.2 | O MODELO CARMMI | 76 |
| 5.3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 84 |
| 6 | IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL..... | 85 |
| 6.1 | TECNOLOGIAS..... | 85 |
| 6.2 | DA MODELAGEM..... | 90 |
| 6.3 | DO MONITORAMENTO | 94 |
| 6.4 | DA INTERFACE | 97 |
| 6.5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 106 |
| 7 | RESULTADOS | 107 |
| 7.1 | ESTUDO DE CASO 1 - ESTUDOS PRELIMINARES SOBRE MOTOR DA GERDAU AÇOS FINOS..... | 107 |
| 7.2 | ESTUDO DE CASO 2 – ENSAIO LABORATORIAL NA PLANTA FOUNDATION FIELD BUS | 112 |
| 7.3 | ESTUDO DE CASO 3 – ESTUDOS PRELIMINARES EM MÁQUINA DA BALANCE SYSTEMS | 114 |
| 7.4 | ESTUDO DE CASO 4 - ESTUDOS SOBRE VÁLVULA COESTER UTILIZADA NA PETROBRÁS | 120 |

| | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| 7.5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 128 |
| 8 | DISCUSSÕES FINAIS | 131 |
| 8.1 | PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES | 133 |
| 8.2 | TRABALHOS FUTUROS | 134 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 1 | Análise da intersecção dos domínios envolvidos..... | 20 |
| Figura 2 | Idéia da abordagem. | 21 |
| Figura 3 | Estrutura da Tese..... | 23 |
| Figura 4 | Arquitetura OSA-CBM (LEBOLD, 2001)..... | 36 |
| Figura 5 | Virtualidade Contínua – adaptado de Milgram (MILGRAM, 1994a) | 43 |
| Figura 6 | Realidade Mista para auxílio em operações na planta (PERRITAZ, 2008). | 53 |
| Figura 7 | Projeto ARVIKA (FRIEDRICH, 2002)..... | 54 |
| Figura 8 | Projeto AMIRE aplicado à indústria petrolífera (GRIMM, 2002)..... | 55 |
| Figura 9 | Projeto STARMATE (SCHWALD, 2001). | 56 |
| Figura 10 | Sistema ARBA (SCHOENFELDER, 2008). | 58 |
| Figura 11 | Sistema AAM (LOK, 2004). | 59 |
| Figura 12 | A metodologia..... | 62 |
| Figura 13 | Etapa de modelagem. | 63 |
| Figura 14 | Detalhamento do bloco “Gerar modelo RV”. | 65 |
| Figura 15 | Estrutura do XML relacional. | 67 |
| Figura 16 | O modelo conceitual. | 73 |
| Figura 17 | O modelo CARMMI. | 79 |
| Figura 18 | O modelo CARMMI integrado ao PDKM completo..... | 83 |
| Figura 19 | A ferramenta <i>SOLIDWORKS</i> | 86 |
| Figura 20 | A ferramenta ARToolkit (KATO, 2000). | 88 |
| Figura 21 | A ferramenta Watchdog (esq) e <i>toolbox</i> do Matlab (dir)..... | 89 |
| Figura 22 | Modelo simplificado das relações e funções do modelo CARMMI. | 91 |
| Figura 23 | Tela principal da versão de desenvolvimento do <i>WatchdogAgent Toolbox</i> | 95 |
| Figura 24 | Modificação da tela principal do <i>WatchdogAgent Toolbox</i> | 96 |
| Figura 25 | Interface de configuração. | 99 |
| Figura 26 | Interface de diagnóstico (visualização da condição) em modo de visualização mista com navegação guiada usando dispositivo desktop..... | 100 |
| Figura 27 | Interface de diagnóstico (manual do equipamento) em modo de visualização mista com navegação automática usando dispositivo HMD..... | 102 |
| Figura 28 | Interface de diagnóstico em modo de visualização mista com navegação guiada usando dispositivo desktop. | 104 |
| Figura 29 | À esquerda, máquina montada antes do início da manutenção. Ao centro, retirada da carenagem. À direita, impregnação com verniz isolante. | 108 |
| Figura 30 | À esquerda, retirada da bucha. Ao centro, controle micrometrado das buchas. À direita, condição de óleo após a retirada das buchas. | 108 |
| Figura 31 | À esquerda, selagem das caixas dos mancais. Ao centro, fechamento das carenagens. À direita, montagem das carenagens. | 109 |
| Figura 32 | Modelos virtuais do motor. | 110 |
| Figura 33 | Modelos virtuais estáticos (a) (b) e dinâmico (c)..... | 110 |
| Figura 34 | À esquerda, <i>hardware</i> utilizado. Ao centro, montagem do experimento. À direita, utilização de HMD para visualização. | 113 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 35 | Operação de remoção do motor para manutenção; componente <i>milling_head</i> | 116 |
| Figura 36 | Modelos virtuais da máquina. | 117 |
| Figura 37 | Modelo virtual do componente <i>milling_head</i> | 117 |
| Figura 38 | Interface de diagnóstico para visualização do guia de manutenção em modo de visualização virtual utilizando dispositivo <i>desktop</i> | 118 |
| Figura 39 | <i>Watchdog</i> com atuador CSR6 da Coester (esq). Valor de confiança obtido da análise de dados do sensor de abertura e fechamento (dir)..... | 121 |
| Figura 40 | Bancada com os atuadores CSR6 e CSR50M..... | 121 |
| Figura 41 | Posições dos acelerômetros. a) caixa de engrenagem; b) compartimento do motor elétrico; c) freio a disco. | 122 |
| Figura 42 | Curva de torque. a) bancada alinhada; b) bancada desalinhada..... | 123 |
| Figura 43 | Interface do <i>Watchdog</i> modificada e saída gráfica do valor de confiança do sinal. | 124 |
| Figura 44 | Experimento com operador utilizando dispositivo HMD. | 125 |
| Figura 45 | Teste da interface mista do sistema CARMMI utilizando HMD..... | 126 |
| Figura 46 | Interfaces do sistema CARMMI desenvolvidas no estudo de caso 4. | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 Etapas e técnicas de um sistema de Manutenção Inteligente [baseado em Djurdjanovic, 2003 e ISO13374-1]. | 31 |
| Tabela 2 Padrões para manutenção industrial. | 33 |
| Tabela 3 Resumo de ferramentas para manutenção. | 42 |
| Tabela 4 Ferramentas para Realidade Mista..... | 46 |
| Tabela 5 Tecnologias de implementação..... | 85 |
| Tabela 6 Tabela de comparação da taxa de quadros por segundo..... | 111 |
| Tabela 7 Tabela avaliativa sobre o sistema de visualização..... | 119 |
| Tabela 8 Resumo de disseminação dos trabalhos..... | 129 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| BoL: | <i>Begin of Cycle</i> |
| CAD: | <i>Computer Aided Design</i> |
| CAE: | <i>Computer Aided Engineering</i> |
| CAM: | <i>Computer Aided Manufacturing</i> |
| CARMMI: | Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de <i>Manutenção Inteligente</i> |
| CBM: | <i>Condition Based Maintenance</i> |
| CMMS: | <i>Computerized Maintenance Management Systems</i> |
| CRIS: | <i>Common Relational Information Schema</i> |
| DMU: | <i>Digital mock-up</i> |
| EAI: | <i>Enterprise Application Integration</i> |
| EoL: | <i>End of Cycle</i> |
| GUI: | <i>Graphical User Interface</i> |
| ICT: | <i>Information & Communications Technology</i> |
| IEC: | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| MI: | Manutenção Inteligente |
| MoL: | <i>Middle of Cycle</i> |
| MIMOSA: | <i>Machinery Information Management Open System Alliance</i> |
| OSA: | <i>Open Standard Architecture</i> |
| PDA: | <i>Personal Digital Assistant</i> |
| PLM: | <i>Product Lifecycle Management</i> |

| | |
|--------|--|
| RA: | Realidade Aumentada |
| RCM: | <i>Reliability Centred Maintenance</i> |
| RFID: | <i>Radio-Frequency IDentification</i> |
| RM: | Realidade Mista |
| SOA: | <i>Service-Oriented Architecture</i> |
| SOAP: | <i>Simple Object Access Protocol</i> |
| TELMA: | <i>TELe-Maintenance</i> |
| TIC: | Tecnologia da informação e comunicação. |
| TPM: | <i>Total Productive Maintenance</i> |
| TUI: | <i>Tangible User Interface</i> |
| UML: | <i>Unified Modeling Language</i> |
| VRML: | <i>Virtual Reality Modeling Language</i> |
| XML: | <i>eXtensible Markup Language</i> |

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A indisponibilidade dos equipamentos é um dos maiores desafios da capacidade produtiva. É através das estratégias de manutenção que paradas indesejáveis podem ser evitadas. O período de indisponibilidade do equipamento aumenta os custos operacionais e, em consequência, interfere na qualidade do produto final. Além das perdas econômicas envolvidas em um acidente ou falha, existem questões de segurança que muitas vezes podem ter repercussões trágicas para as pessoas e empresas envolvidas.

É neste sentido que o uso de técnicas de realidade mista (RM) para gerar, posicionar e mostrar elementos virtuais integrados ao cenário real como forma de auxiliar o processo de manutenção pode representar uma importante estratégia de apoio à tomada de decisão e uma interessante contribuição na formalização dos conceitos abordados na disciplina de manutenção (BUCCIOLI, 2006).

O uso de tecnologias de realidade virtual/mista e aumentada na indústria está associado à redução de tempo da maioria das etapas dos processos industriais bem como, à segurança do operador de manutenção (LEE, 2005). Por outro lado, o uso de sistemas de manutenção inteligente (MI), possibilita uma predição de falhas em componentes evitando paradas do equipamento (LIYANAGE, 2009).

Assim, a possibilidade de geração dinâmica de conteúdo virtual integrado ao sistema de manutenção inteligente, para auxiliar o operador durante a atividade de manutenção, representa uma contribuição ao meio científico e tecnológico uma vez que soluções que contemplem ambos os temas (RM e MI) são raras. Além disso, poucos trabalhos referentes a interfaces homem-máquina são encontrados no âmbito dos sistemas de manutenção.

Sendo o tema amplo e de caráter multidisciplinar, o desenvolvimento de uma tese de doutorado que contribua na exploração destes conceitos e proponha novas soluções para o uso destas tecnologias é relevante para o avanço nestas pesquisas. Embora sejam encontrados na literatura trabalhos a respeito do uso de realidade mista na manutenção industrial, modelos para integração destes dados e consequente aplicação em chão de fábrica são alguns dos gargalos destas propostas. Os desafios para solução destes gargalos aliados aos parâmetros de custo e segurança nas atividades de manutenção foram os principais fatores que desencadearam a motivação para o desenvolvimento desta Tese.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A manutenção industrial é um campo intensivo de conhecimento baseado em diferentes disciplinas e envolvido por várias tecnologias. Assim, até hoje, a complexidade da manutenção tem sido a principal limitação para melhoras substanciais na disciplina de manutenção (RUSINÁ, 2010). Na verdade, importantes avanços em tecnologias de apoio a manutenção são necessárias para permitir uma abordagem de engenharia de manutenção que desenvolva plenamente seu potencial (KANS, 2009).

A urgente demanda por novas estratégias de manutenção vêm do fato da nova contextualização do cenário mundial em termos de manufatura. Enquanto a indústria nacional busca novos paradigmas de manutenção baseada em condição¹, o mercado internacional busca alternativas e soluções para uma manufatura sustentável baseada nos requisitos “*eco-green*”², e a manutenção é peça fundamental neste novo contexto.

¹ Manutenção baseada em condição ou CBM (*Condition-based maintenance*) – estratégia de manutenção que baseia-se no monitoramento das condições de uso do equipamento através do uso de sensores.

² Termo utilizado em políticas de manufatura sustentável, que se baseia no uso de recursos energéticos renováveis – energia eólica, solar; recuperação de componentes; estratégias de reuso e descarte de peças e equipamentos, entre outros. LI, D.; et al. An emergy analysis-based methodology for eco-efficiency evaluation of building manufacturing. ORIGINAL RESEARCH ARTICLE ECOLOGICAL INDICATORS, In press, Corrected Proof, 2011.

Esta nova maneira de fazer manufatura faz com que a manutenção desempenhe hoje um papel crucial para alcançar a competitividade na produção (LEE, 2010). Na verdade, a palavra manutenção torna-se um pouco limitada para expressar o que pode ser feito para garantir a confiabilidade, qualidade, disponibilidade e segurança em ativos industriais dentro do contexto da engenharia de sistemas. Eficiência e eficácia na fabricação devem considerar restrições não só técnicas, mas também econômicas e sociais (PEZZOTTA, 2009).

O gerenciamento do ciclo de vida de ativos está se tornando uma extensão do conceito de manutenção "clássica". Com base nisso, a adoção de uma abordagem integrada (sistêmica) é essencial. O impacto da melhoria dos serviços de manutenção através do uso de modernas tecnologias da informação e comunicação (TICs) são algumas das questões a serem abordadas pela manutenção na visão de uma manufatura competitiva (TSUTSUI, 2009).

A multidisciplinaridade e a complexidade dos temas envolvidos indicam a necessidade de soluções em termos de padrões e estratégias para o suporte a atividade de manutenção. Entretanto, somente em meados dos anos noventa, começou-se a falar sobre TPM (*Total Productive Maintenance*). A manutenção produtiva total implementava um sistema onde os custos com paradas e defeitos eram reduzidos e a qualidade dos produtos era garantida pelo envolvimento de todos os operários da planta em processos contínuos de manutenção (FUMAGALLI, 2008).

Em meados de 2000, começam as discussões a respeito da *e-maintenance*, outra estratégia para avanços na área de manutenção. Embora ainda não exista uma padronização para a definição do termo, a *e-maintenance* visa a obtenção de um aperfeiçoamento dos processos de manutenção tornando-os mais *e-eficientes* e *e-eficazes* com o uso de TICs (MULLER, 2008b) (WOHLWEND, 2005). Neste sentido, o estado da arte em estratégias de manufatura começa a abrir caminho para pesquisas específicas no âmbito de engenharia de manutenção, serviços e tecnologias avançadas aplicadas à manufatura (LIYANAGE, 2009).

Um dos grandes desafios atuais da manutenção é, sem dúvida, o gerenciamento da informação. Ao longo do ciclo de vida dos produtos uma grande quantidade de informação é gerada por diversos sistemas. Assim é absolutamente essencial que soluções sejam pensadas para facilitar o acesso aos dados a fim de dar suporte ao entendimento da informação para geração do conhecimento e minimização do tempo de execução das tarefas.

Para este propósito, novas tecnologias baseadas em TICs e microeletrônica, tais como: captura de dados inteligentes, redes sem fio, Internet de Coisas (*Internet of Things - IoT*) (UCKELMANN, 2011), sensores inteligentes e assim por diante, estão fornecendo meios juntamente com ambientes inteligentes de reinventar a maneira de fazer a manutenção. A precisão nas ações do operador, durante a atividade de manutenção, depende do conhecimento do processo de manutenção como um todo (ALI, 2002). E as interfaces homem-máquina podem auxiliar na geração e acesso a esse conhecimento no local e momento certo.

Neste sentido, este trabalho pensa nas interfaces de visualização como uma solução ao gerenciamento e integração das diversas informações envolvidas na atividade de manutenção. Recentes avanços das interfaces gráficas têm trazido novas possibilidades de visualização. Atualmente as pesquisas estão além das interfaces gráficas para usuário (GUI – *Graphical User Interface*), termos como Interfaces Tangíveis (TUI – *Tangible User Interface*) (ULLMER, 2000), Ambientes *Ubiquitous*, Realidade Virtual, Mista e Aumentada são cada vez mais comuns e representam uma vantagem substancial em termos de visualização e interação (BENBELKACEM, 2009) (FUMAGALLI, 2008).

A realidade virtual, através de técnicas de realidade mista/aumentada, surge como uma solução de visualização 3D capaz de ser utilizada entre outras funcionalidades como ferramenta de apoio à supervisão e à atividades de manutenção (NAKAJIMA, 2003) (ZENATI, 2004). A possibilidade de sobreposição de objetos virtuais e de outras informações geradas por computador com o ambiente físico em tempo real, neste caso o equipamento

monitorado, representam uma solução de apoio ao processo de manutenção industrial (MACCHIARELLA, 2004) (APPEL, 2003).

Sendo assim, optou-se, neste estudo, pela utilização de interfaces mistas após avaliar os tipos de interface e suas aplicabilidades nos sistemas PLM (*Product Lifecycle Management*) em ambientes industriais. A maioria das ferramentas PLM usa o padrão, baseado em *desktop* tipo GUI, onde o usuário clica em botões e *sliders* para controlar a simulação. O principal propósito da interface GUI é o controle, e suas limitações para esta proposta incluem: baixa usabilidade para não especialistas e pouca integração entre modelos reais e virtuais.

A possibilidade de modificar o conteúdo virtual sem qualquer programação e a necessidade de simplificar o acesso a informação nos bancos de dados sobrecarregados das ferramentas PLM, ampliam as pesquisas na área de interfaces tangíveis (TUI – *Tangible User Interface*). De acordo com a definição de (FIORENTINO, 2009) a TUI é uma interface que emprega objetos reais com representação e controle para a mídia computacional. Assim como a GUI, a TUI é usada para controle de simulação, no entanto ela também representa um objeto virtual que faz parte da simulação.

Por outro lado o uso de tecnologias de realidade virtual tais como realidade mista e aumentada configuram o cenário ideal para utilização de interfaces tangíveis. Apesar da diversidade de conceitos sobre realidade virtual a maioria recai nas características de imersão, interação e envolvimento. A realidade mista ou misturada (*Mixed Reality*) possibilita a sobreposição de objetos virtuais gerados por computador no ambiente físico, mostrada ao usuário, em tempo real, com o apoio de um dispositivo tecnológico de interação.

A combinação entre componentes reais e virtuais no ambiente de visualização constituirá a cena mista que irá auxiliar o operador durante a atividade de manutenção. A realidade mista tem sido utilizada para facilitar atividades de manutenção tais como: guia de

instruções (BARATOFF, 2004), substituição de peças (REGENBRECHT, 2005) e inspeção (HENDERSON, 2010). No entanto, o potencial de utilização dessas técnicas para disponibilização da informação necessária a atividade de manutenção poderia ser alcançado através de uma integração entre dois campos de pesquisa: manutenção inteligente (MI) e realidade mista (RM).

Dessa forma, foram investigadas as áreas da manutenção onde a realidade mista poderia permitir uma mudança significativa em termos de eficiência, sendo as seguintes áreas identificadas: i) diagnóstico, ii) planejamento e iii) segurança.

i) No diagnóstico de manutenção³, a realidade mista pode permitir um re-projeto para que a abordagem de solução de problemas passe do modo de falha para um modo de causa da falha. Assim através da visualização é possível entender o mecanismo de falha e descobrir plenamente as razões da falha. A completa imersão do operador de manutenção no processo de solução de problemas torna-o parte ativa do sistema de computador local ou remoto para gerir o processo de diagnóstico. Além disso, com base no diagnóstico de falha e informações afins, o computador será capaz de sugerir/planejar o reparo/solução de recuperação. Desta forma, diagnosticado o problema através da visualização é possível tratar paralelamente aspectos de manutenção preventiva.

ii) No planejamento de manutenção a realidade mista pode auxiliar na configuração e identificação dos elementos necessários para executar uma atividade de manutenção (isto é, acessórios, componentes, peças de reposição e etc). Desta maneira o planejador pode visualizar cada interferência entre o equipamento da fábrica e o *hardware* de manutenção requerido, verificando com o suporte do sistema de visualização, quais equipamentos

³ Diagnóstico de manutenção é o estudo e análise dos sintomas (anomalias), dos mecanismos de ação, suas causas e suas origens (BAE, 2005).

necessitam ser parados, como a atividade de manutenção pode ser melhor organizada e assim por diante. Esta abordagem é similar a uma utilizada para planejamento de operações para propósitos de montagem (LIVERANI, 2004). O plano redefinido poderá ser armazenado junto com as informações procedurais e gráficas, para mais tarde auxiliar o operador de manutenção quando a atividade for iniciada.

iii) A respeito da segurança em manutenção, a realidade mista pode dar uma substancial contribuição em um dos principais problemas não resolvidos nas atividades de manutenção. Isto é, o risco para o pessoal de manutenção durante a realização de suas atividades. Na verdade, mesmo que muitos avanços tenham sido realizados nos últimos anos graças ao uso dos equipamentos e procedimentos de segurança, em muitos casos, o trabalho de manutenção é ainda uma atividade perigosa. Para estes casos, a realidade mista trazendo uma informação completa para o chão de fábrica, pode permitir que o operador de manutenção através de sua imersão identifique visualmente situações de perigo na planta (partes do equipamento com alta temperatura, alta voltagem, pressão, partes que podem movimentar-se, etc).

A principal idéia é fornecer meios de visualizar e interagir com as informações do sistema de manutenção inteligente (MI) através do sistema misto, possibilitando através da integração dos dados, que os sistemas atuem em conjunto. Esta atuação dar-se-á de maneira que as informações visuais de diagnóstico, planejamento e segurança sejam apresentadas dinamicamente. Ou seja, o conteúdo virtual é gerado de acordo com as ações efetuadas pelo operador e pelo sistema de manutenção no ambiente.

Uma vez relacionadas às informações dos modelos, será possível gerar um conteúdo virtual a respeito do funcionamento e manutenção da máquina em questão. A integração de

informações irá auxiliar os operadores na tomada de decisão através da visualização mista durante o processo de manutenção. No entanto, é preciso identificar cada componente do equipamento que está sendo monitorado pelo sistema MI. Para este propósito, identificou-se a necessidade de relacionar três tipos de dados: dados virtuais, dados de manutenção e dados CAx (CAD, CAE e CAM).

- Dados Virtuais: são modelos virtuais 3D a respeito do componente ou equipamento.
- Dados de Manutenção: são todos os dados gerados por sistemas de manutenção inteligente (gráficos 2D, textos e planilhas eletrônicas) a respeito do funcionamento/comportamento de componentes do equipamento.
- Dados CAx: são dados gerados por sistemas CAD, CAE e CAM representando respectivamente modelos de projeto (*Computer-aided design*), engenharia (*Computer-aided engineering*) e manufatura (*Computer-aided manufacturing*).

Sendo os dados CAx responsáveis por gerar a descrição de componentes da máquina ao qual se deseja visualizar informações do sistema de manutenção. A Figura 1 representa os domínios envolvidos e as possibilidades de visualização com suas integrações (ou intersecções).

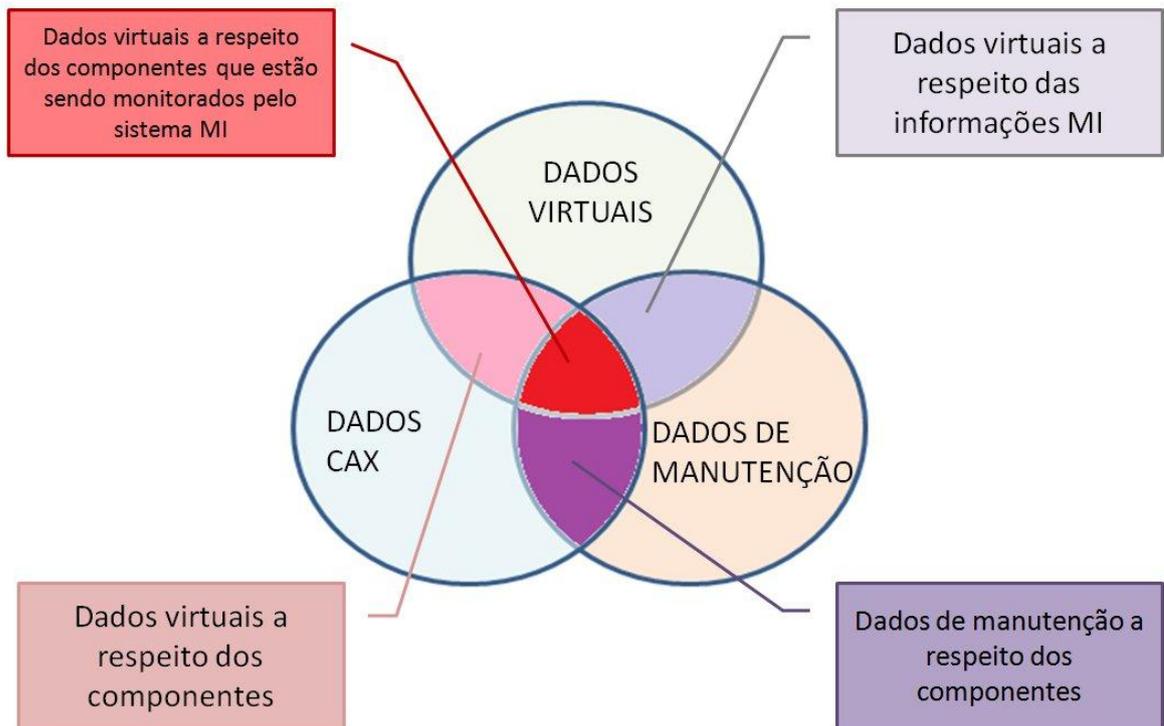


Figura 1 Análise da intersecção dos domínios envolvidos.

A área vermelha representa o foco de pesquisa desta Tese e engloba a intersecção entre três domínios que representam os dados virtuais relacionados a cada um dos componentes da máquina que está sendo monitorado pelo sistema de manutenção inteligente.

Logo, a proposta deste trabalho pretende fornecer uma abordagem para o desenvolvimento de uma interface mista não somente para visualizar dados de manutenção, mas para fornecer uma interface de integração e gerenciamento de informações em termos de processos de diagnóstico, planejamento e segurança em atividades de manutenção.

Trabalhos científicos na área de RM e manutenção têm mostrado que a grande quantidade de aplicações e soluções em novas interfaces não aborda de maneira detalhada o problema da integração de diferentes formatos de dados. Uma vez não identificadas descrições a respeito de modelos de integração de dados em interfaces mistas para manutenção, o

referencial teórico desta Tese divergiu em duas áreas: manutenção inteligente e seus modelos de descrição de dados; e realidade mista e suas potencialidades para a manutenção.

O objetivo desta Tese é fornecer uma modelagem para implementação efetiva de interface mista em sistemas de manutenção. Os dados virtuais irão compor cenas para diagnóstico, planejamento e aplicações de segurança. Para isto, a abordagem apresenta um modelo denominado CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*). Este modelo representa uma solução para descrição do relacionamento entre três tipos de dados: dados CAx, dados de manutenção e dados virtuais. A Figura 2 representa o esboço da abordagem.



Figura 2 Idéia da abordagem.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa Tese é fornecer um modelo de descrição e integração de diferentes tipos de dados para potencializar o uso de visualização mista em atividades de manutenção industrial. Este modelo será utilizado para o aprimoramento das interfaces homem-máquina e contribuirá tanto na redução do tempo de inatividade do equipamento quanto para a segurança do operador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Propor uma solução que adquira os dados do sistema de manutenção inteligente e do sistema de realidade mista, filtre as informações pertinentes, relacione-as e as transfira para a interface de visualização;
- Desenvolver uma interface que possibilite a visualização mista (misturada ao ambiente real, ou seja, sobre o equipamento) de informações tais como: gráficos de saúde do equipamento; textos guias de tarefas de manutenção; visualização da estrutura da máquina; vídeos 3D; informações sobre causa da falha em históricos de manutenção;
- Gerenciar a grande quantidade de informação sendo disponibilizada em diferentes formatos por diversas ferramentas envolvidas no processo de manutenção de forma a inserir o operador nas etapas do ciclo de vida do equipamento em questão, e facilitar o acesso a informação por parte do mesmo;
- Validar a solução em pelo menos dois estudos de caso reais da indústria.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta Tese de Doutorado está organizada da seguinte forma:

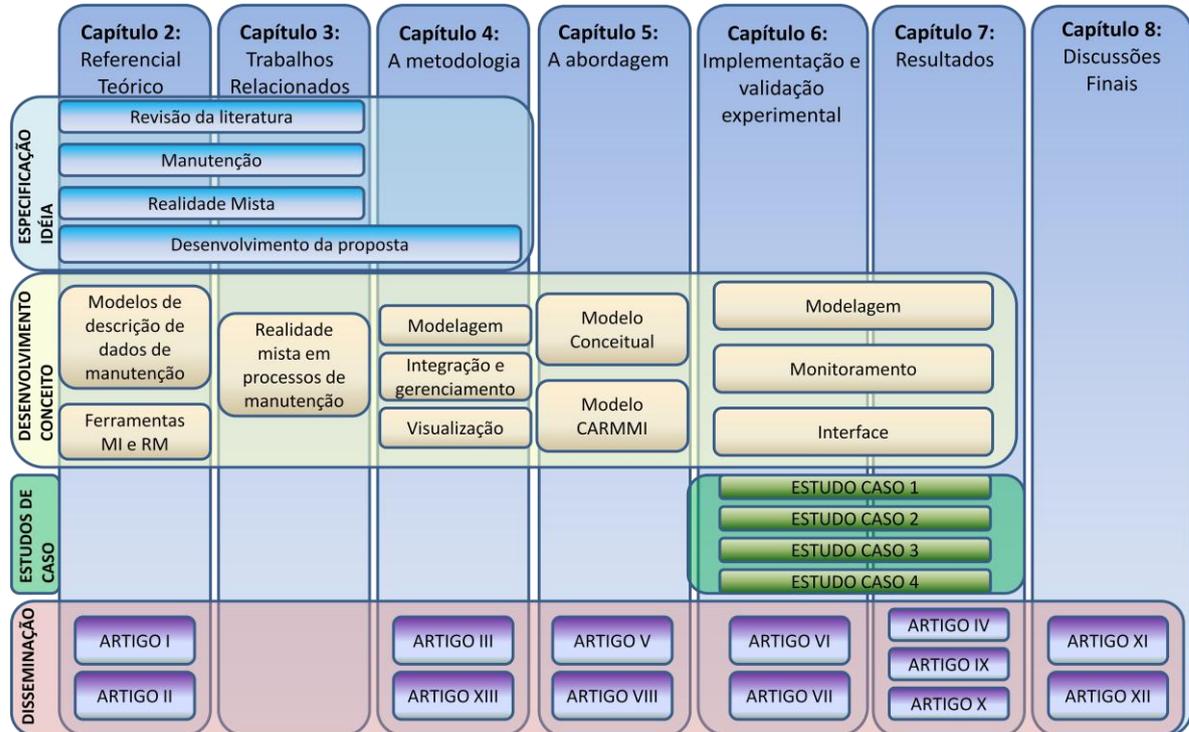


Figura 3 Estrutura da Tese.

O **Capítulo 2** apresenta o referencial teórico a respeito dos principais conceitos necessários para o entendimento deste trabalho. Neste capítulo são descritos a fundamentação conceitual sobre manutenção, manutenção inteligente e realidade mista. Sobre manutenção inteligente são exploradas questões a respeito dos modelos de descrição de dados de manutenção e ferramentas MI. Na seção sobre realidade mista são apresentados conceitos, dispositivos de realidade virtual e ferramentas de RM utilizados para utilização desta tecnologia.

O **Capítulo 3** apresenta os trabalhos relacionados ao uso de realidade mista em sistemas de manutenção. Este capítulo apresenta soluções existentes no contexto da

abordagem proposta fazendo um comparativo em termos de vantagens e limitações da proposta desta Tese.

No **Capítulo 4** é descrita a metodologia desenvolvida. A metodologia é dividida em três etapas: (i) modelagem, (ii) integração e gerenciamento e (iii) visualização. Cada uma das etapas é descrita nas seções do capítulo.

O **Capítulo 5** descreve a abordagem baseada em modelo, resultante da implantação da metodologia descrita no capítulo anterior. Os modelos resultantes da cada uma das etapas da metodologia constituem o modelo conceitual da abordagem. A partir do modelo conceitual é gerado o modelo base da implantação desta solução, descrito em diagrama de classes e denominado CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*).

O **Capítulo 6** apresenta detalhadamente a implementação e a validação experimental da abordagem. A primeira seção lista as tecnologias utilizadas em cada uma das etapas de implementação. As seções seguintes descrevem a implementação do modelo CARMMI, do sistema de manutenção para monitoramento e da interface de visualização.

O **Capítulo 7** mostra os resultados gerados a partir da implantação da abordagem. A validação do modelo e do sistema é realizada no contexto de quatro estudos de caso da indústria. Alguns experimentos são executados parte em laboratório e parte em chão de fábrica.

O **Capítulo 8** discute e apresenta as principais contribuições, inovações e limitações desta proposta. Por fim, são apresentados os trabalhos futuros no âmbito da continuidade desta Tese em projetos nacionais e internacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta conceitos importantes para o entendimento do trabalho. A primeira seção apresenta uma contextualização a respeito da manutenção industrial. A segunda seção descreve a manutenção inteligente (MI), incluindo as principais etapas e técnicas relacionadas a cada um de seus estágios. Em seguida são apresentadas as ferramentas em termos de padrões, plataformas e sistemas para implantação desta estratégia de manutenção. A terceira seção aborda a realidade mista (RM) e suas potencialidades como técnica de visualização passível de ser utilizada em sistemas de manutenção. Ferramentas para o uso de RM são discutidas na seção 2.3.

2.1 A MANUTENÇÃO

A manutenção industrial exerce, atualmente, papel crucial no alcance de importantes vantagens competitivas em termos de economia de custos e melhora de desempenho dos equipamentos (FUMAGALLI, 2009). O aprimoramento da atividade de manutenção impacta em diversas áreas da organização tais como: produtividade, qualidade e segurança. Assim, a implantação de estratégias de manutenção tem se tornado fundamental para garantir uma máxima disponibilidade dos equipamentos de produção a um menor custo.

Uma estratégia de manutenção é definida como uma regra de decisão que estabelece uma seqüência de ações a serem realizadas de acordo com o estado do sistema (HAUSLADEN, 2004). Como cada ação de manutenção é geralmente associada a um custo, uma duração e a uma certa qualidade ou eficiência, o desempenho da estratégia é geralmente avaliado em termos do custo médio total ou da disponibilidade do sistema.

Dessa forma, um grande número de políticas de manutenção tem sido propostas na literatura, o que implica em diferentes tipos de ações preventivas, corretivas e preditivas, tais como: inspeção, substituição por componentes usados ou novos, reparos para um novo estado, reparo mínimo (consiste em trazer o sistema de volta ao mesmo estado de operação de antes da falha), e assim por diante (BAKOUROS, 2009).

Nas estratégias preventivas, o operador de manutenção executa, periodicamente, uma seqüência de atividades de manutenção no equipamento, sem conhecimento prévio, do exato componente da máquina que necessita de reparo. A manutenção corretiva corrige falhas através de reparo ou substituição de componentes no momento da falha. No entanto, equipamentos críticos da indústria, onde o tempo de parada ocasiona prejuízos/perdas na produção, demandam o estudo por estratégias preditivas de manutenção. Estas estratégias de predição permitem antecipar a ocorrência de falhas, de modo que intervenções possam ser feitas antes que problemas ocorram e exijam a parada dos processos.

De fato, o que está mudando não é o papel da manutenção, mas a maneira como esta está sendo implementada. Conceitualmente a manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, que mantém ou restabelece um item para a condição de funcionamento em que possa executar a função requerida (IEC, 2004). No entanto, a manutenção pode ser vista também como um processo que monitora a capacidade técnica do sistema para fornecer um serviço. Este processo pode armazenar problemas para posterior análise, executar ações preventivas, corretivas e adaptativas. Desta forma, o propósito do processo de manutenção é garantir a capacidade do sistema de fornecer um serviço (ISO/IEC, 2008).

Um processo genérico de manutenção consiste nas fases de: gerenciamento, suporte ao planejamento, preparação, execução, avaliação e aperfeiçoamento (IEC, 2004). Conseqüentemente, a manutenção é um tema multidisciplinar e envolve um amplo conjunto

de regras, bem como, um amplo número de atores envolvidos (gerenciadores, técnicos de manutenção, planejadores e gerenciadores logísticos).

Os recursos necessários para auxiliar a atividade de manutenção são muitos. Entre estes citam-se: documentação (guias de manutenção e histórico de manutenção), pessoas, ferramentas de suporte, materiais, peças de reposição, sistemas de informação. Desta forma, disponibilizar a informação certa, no momento certo para o operador, não é uma tarefa trivial.

O gerenciamento da manutenção de uma planta industrial tem sido uma atividade complexa devido à grande quantidade de informação e recursos a serem controlados. Atualmente, sistemas de gerenciamento de manutenção computadorizado CMMS - *Computerized Maintenance Management Systems* – auxiliam a organizar a informação e desta forma realizar a atividade de manutenção de forma mais eficiente.

Entretanto, além da coleção de dados e informações a respeito da manutenção, outras análises devem ser feitas e somente algumas delas podem ser realizadas pelos sistemas CMMS. Ferramentas para análise de uma manutenção centrada em confiabilidade - *Reliability Centred Maintenance* (RCM) existem para este propósito (GABBAR, 2003).

A abordagem RCM contém uma grande variedade de técnicas de engenharia, tais como o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), RBD (*Reliability Block Diagram*), RP, (*Reliability Prediction*), FTA (*Fault Tree Analysis*), ETA (*Event Tree Analysis*), WA (*Weibull Analysis*), e representa uma das formas mais eficazes para avaliar e otimizar as políticas de manutenção (TUCCI, 2006).

Moubray (2001) afirma que "a RCM é um processo utilizado para determinar: o que deve ser feito para garantir que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça em seu contexto operacional". Gabbar (2003) diz que a RCM é um processo de diminuir o esforço e o tempo consumido nas atividades de manutenção a fim de decidir as estratégias de manutenção de acordo com a confiabilidade dos dados. Esta análise

deve ser feita periodicamente e atualizada em tempo real com relação ao histórico de manutenção coletado no banco de dados CMMS.

Surge então, em meados de 2000, o termo *e-maintenance* numa tentativa de superar os desafios no contexto da informação através do auxílio das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs). Embora não haja até hoje uma padronização oficial do termo, a *e-maintenance* pode ser encarada como um processo de suporte a manutenção que inclui recursos, serviços e processos de gerenciamento necessários para permitir uma execução proativa das atividades de tomada de decisão (LEGER, 2004). Isto inclui não somente tecnologias (baseada em *web*, infotrônica e *wireless*), mas também atividades de manutenção (monitoramento, diagnóstico e prognóstico).

Conclui-se que a efetividade (qualidade) da informação necessária durante a atividade da manutenção depende intimamente da logística desta informação durante todo o ciclo de vida do produto. Os sistemas PLM (*Product Lifecycle Management*) buscam integrar diferentes tipos de atividade técnicas, gerenciais e organizacionais desempenhadas por diferentes atores durante o ciclo de vida do produto (LEE, 2009a). Os estágios do ciclo de vida de um produto cobrem desde o conceito, projeto e desenvolvimento (*Begin of Life - BoL*), até o uso, serviço e manutenção (*Middle of Life - MoL*) e descarte/reciclagem (*End of Life - EoL*) de componentes do produto.

O processo de manutenção está localizado na etapa MoL do ciclo de vida do produto, ou seja, quando o produto está em fase de funcionamento. No entanto, as informações geradas no início do ciclo de vida devem ser utilizadas para melhor precisão nas atividades de manutenção. E os dados gerados pela manutenção devem ser enviados para a próxima etapa do ciclo de vida, EoL, para garantir um melhor desempenho referente a qualidade da informação. As informações da etapa MoL interligam os estágios BoL e EoL do ciclo de vida do produto.

A manutenção baseada em condição (*Condition Based Maintenance* – CBM) busca monitorar o estado de funcionamento dos componentes durante todas as etapas do ciclo de vida do produto (MOORE, 2006) (THURSTON, 2001). Este monitoramento é realizado mediante sensoriamento, análise e processamento de sinais. Esta estratégia de manutenção dá origem à inteligência embarcada em dispositivos com propósito de aperfeiçoamento da atividade de manutenção (LEE, 2009b). Com isto surge um novo campo de pesquisas denominado manutenção inteligente.

2.2 MANUTENÇÃO INTELIGENTE

Sistemas de manutenção inteligente, também conhecidos como sistemas preditivos de manutenção fornecem, ao operador, informações em tempo real sobre o estado da planta e/ou equipamento e baseiam-se na estratégia CBM de manutenção (LEBOLD, 2001). Estes sistemas enfocam o uso de ferramentas computacionais e sensores embarcados em máquinas e equipamentos, a fim de permitir uma evolução dos sistemas tradicionais de manutenção corretiva e preventiva para um sistema preditivo (LEE, 2001).

O foco dos sistemas preditivos é o entendimento do processo de degradação natural dos componentes, com base no estado e na condição de uso dos equipamentos (FUMAGALLI, 2009). Desta forma, através do uso de dispositivos inteligentes de diagnósticos, os sistemas avaliam o desempenho de máquinas e equipamentos, os quais sofrem desgastes durante sua operação, diminuindo sua confiabilidade e aumentando a probabilidade de ocorrência de falhas (PEYSSON, 2007) (LI, 2004).

O objetivo destes sistemas é obter um tempo de parada em processos industriais próximo de zero e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de produtos e serviços. Para isto torna-se cada vez mais importante prever e minimizar as paradas do processo de produção

(MATHEW, 2006a) (MULLER, 2008a) a fim de minimizar os prejuízos causados por falhas inesperadas.

A queda no desempenho representa um indicativo de defeitos nos componentes do sistema, podendo ser usado para identificar comportamentos inaceitáveis antes mesmo que estes ocorram (JARDINE, 2004). A avaliação do desempenho se baseia na colocação de sensores em equipamentos, que fornecem informações relacionadas ao comportamento dos componentes.

Estes sensores fornecem sinais que permitem o monitoramento do desempenho do equipamento ao longo do tempo. Baseado no desempenho previsto, os agentes de diagnóstico (componentes de *hardware* e *software* embarcados) predizem o potencial de falha antes que esta ocorra, promovendo assim a manutenção preditiva (GONÇALVES, 2011) (LAZZARETTI, 2007) (CARVALHO, 2008).

Logo, durante a revisão, buscou-se analisar quais são as etapas necessárias para a implementação desta estratégia de manutenção, bem como, quais são as técnicas utilizadas para sua implantação. Constatou-se que a maioria dos sistemas de manutenção preditiva divide em pelo menos quatro etapas a implementação da MI. Estas etapas são descritas na Tabela 1 e algumas delas estão implementadas na interface do sistema MI (*Watchdog Agent*) conforme Figura 23 do Capítulo 6 de Implementação.

A Tabela 1 apresenta as principais técnicas adotadas para implementação de cada um dos estágios da MI e foi elaborada baseando-se no estudo de Djurdjanovic e Lee (DJURDJANOVIC, 2003). Uma breve descrição a respeito destas técnicas é apresentada no intuito de fornecer subsídios ao entendimento destes métodos para posterior utilização dos dados gerados pelos seus respectivos algoritmos de implementação.

Tabela 1 Etapas e técnicas de um sistema de Manutenção Inteligente [baseado em Djurdjanovic, 2003 e ISO13374-1].

| Etapa | Técnicas |
|-----------------------------|--|
| Processamento de sinais e | Transformada de Fourier – FT - (YUAN, 2004) |
| Extração de características | Transformada de Wavelet – WT - (YAN, 2003) Análise Tempo-Frequência – STFT - (DJURDJANOVIC, 2002) Análise de Pacotes Wavelet (YAN, 2003) |
| Avaliação da degradação | Regressão Logística (YAN, 2004) Mapas auto-organizáveis – SOM - (HAYKIN, 2002) |
| Predição do comportamento | ARMA (DJURDJANOVIC, 2003) Redes Neurais – NN - (YU, 2004) Matriz de Predição (LIU, 2003) |
| Diagnóstico | Modelo de Markov – HMM - (LIU, 2003) Redes Bayesianas (NIEDERMAYER, 2008) |

Na etapa de processamento de sinais e extração de características os dados são manipulados e técnicas como Transformada de Fourier (*Fourier Transform* - FT), Transformada de Fourier com Janelamento, Transformada de Wavelet (*Wavelet Transform* - WT) e a Transformada de *Wavelet Packet* podem ser utilizadas. A *Transformada de Fourier* (YUAN, 2004) é utilizada para sinais não periódicos e permite uma descrição em frequência, entretanto informações do instante de tempo em que ocorrem as mudanças não são possíveis com este método.

A *Transformada de Fourier com janelamento* permite a obtenção de informações temporais, entretanto quanto maior a janela temporal menor a resolução em frequência e vice-versa. Quanto menor a janela temporal maior a resolução em frequência. As *Wavelets* (YAN, 2003) possibilitam alterar o tamanho da janela temporal, implementando as janelas de tamanho variável.

Para avaliação da degradação do sinal, a *Regressão logística* (YAN, 2004) e os *Mapas Auto-Organizáveis* (HAYKIN, 2002) podem ser utilizados. A *Regressão logística* busca um modelo de ajuste que classifique os dados de entrada em um espaço binário de saída, suas respostas são geralmente sucesso ou fracasso.

Os *Mapas Auto-Organizáveis (Self-Organization Maps - SOM)* são subtipos de *Redes Neurais* utilizados para representação de dados multidimensionais. Este método facilita a visualização de grandes quantidades de informações, bem como reduz a dimensionalidade do espaço de saída.

Para a predição de comportamento, utiliza-se comumente o método *ARMA (Auto-Regressive Moving Average)*, as *Matrizes de Predição*, e as *Redes Neurais*. O *ARMA* pressupõe que a série de tempo é estacionária e que o modelo do sistema é linear e determinístico. Logo sua utilização é impraticável para muitos dos sistemas práticos reais uma vez que estes são dinâmicos e não lineares. As matrizes de predição (*Match Matrix*) (LIU, 2003) são utilizadas para modelos não lineares, entretanto necessitam de grandes quantias de históricos de dados.

Outro método utilizado na predição de comportamento são as *Redes Neurais* (YU, 2004). Esta técnica é baseada em um modelo não linear complexo, estruturado em formato de conjunto de neurônios com seus respectivos pesos, que podem ser aplicadas a processos dinâmicos ou não-determinísticos. Alguns modelos são treinados de modo a identificar um padrão buscando-se prever o comportamento futuro. Este método é aplicado a sistemas complexos e necessita de grande poder computacional para o treinamento dos dados.

Entre as técnicas utilizadas para diagnóstico citam-se *Modelos de Markov* e *Redes Bayesianas*. Modelos ou Cadeias de *Markov* (LIU, 2003) são modelos matemáticos para processos estocásticos. Esta técnica é aplicada para diagnóstico de falhas, degradação em sinais não estacionários e sistemas dinâmicos tais como: bioinformática e reconhecimento de fala.

As *Redes Bayesianas* (NIEDERMAYER, 2008) são modelos probabilísticos que representam as variáveis e as relações de dependência entre elas. São aplicadas a sistemas complexos para identificação de causa e efeito quando não existe ainda um procedimento

padrão para especificar a rede, logo é necessário conhecimento especialista para sua formação. Este método é utilizado para tomada de decisão a respeito de diagnóstico.

Cabe salientar que outras técnicas e etapas podem ser aplicadas para o desenvolvimento de um sistema MI, no entanto apresentou-se aqui um breve resumo dos principais métodos comumente aplicados sem a pretensão de detalhá-los. Informações referentes a cada um dos métodos podem ser encontradas nas referências indicadas na Tabela 1 e em Gonçalves (2007) (2009). Esta diversidade de etapas e técnicas deu origem a uma variedade de ferramentas MI, que são discutidas a seguir.

2.2.1 FERRAMENTAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE

A maioria dos sistemas de manutenção inteligente implementam as etapas descritas na Tabela 1. Diversas soluções foram encontradas para implantação desta estratégia de manutenção preditiva, podendo-se classificá-las em: padrões, plataformas e sistemas conforme descrito abaixo:

2.2.1.1 PADRÕES

Diversas normas e arquiteturas para padronização de processos para suporte a atividade de manutenção foram desenvolvidos para a indústria. Os principais são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 Padrões para manutenção industrial.

| Padrão | Descrição |
|---------------|---|
| IEEE 1451 | Norma para sensoriamento |
| IEEE 1232 | Norma para troca de informações |
| ISO 13373-1 | Norma para monitoramento |
| ISO 13374 | Norma para monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas |
| MIMOSA | Arquitetura para gerenciamento da informação |
| OSA-CBM | Arquitetura para manutenção baseada em condição |
| OSA-EAI | Arquitetura para integração de dados |

Como a manutenção preditiva baseia-se no monitoramento da condição de uso do equipamento, é fundamental que se conheça os dispositivos de *hardware* e *software* necessários para análise de comportamento dos componentes deste equipamento. Neste sentido, alguns padrões foram definidos por organizações internacionais no intuito de fornecer subsídios conceituais e tecnológicos para implantação da estratégia de manutenção MI.

A norma IEEE Std 1451 é um padrão de interface para transdutores inteligentes. Esta norma descreve auto-identificação de transdutores e auto-configuração.

A norma IEEE Std 1232, incorpora terminologias específicas para MI e visa facilitar a portabilidade de diagnóstico, habilitar a troca de informações e integrar capacidades de diagnóstico ao sistema.

A norma ISO 13373-1 fornece um guia para monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas através da análise de vibração. Se compararmos as normas IEEE Std 1451 e ISO 13373-1 observa-se que o módulo sensor pode ser desenvolvido utilizando a IEEE Std 1451 e o módulo de monitoramento de condição pode ser desenvolvido utilizando a ISO 13373-1 e IEEE 1232.

A norma ISO-13374 (*Condition Monitoring and Diagnostics of Machines*) (ISO-13374, 2003) estabelece uma especificação para o fluxo de informações e processamento de dados de diagnóstico e monitoramento de saúde de equipamentos. Esta norma divide os sistemas de manutenção baseado em condição – CBM, em seis módulos funcionais: *data acquisition* (DA), *data manipulation* (DM), *state detection* (SD), *health assessment* (HA), *prognostics assessment* (PA) e *advisory generation* (AG).

A arquitetura OSA-CBM (*Open Systems Architecture for Condition-based Maintenance*) (OSA-CBM, 2009) é uma descrição em linguagem UML (*Unified Modeling Language*) da especificação funcional da norma ISO-13374. A arquitetura fornece um modelo para que implementações multi-tecnológicas possam ser desenvolvidas de acordo com as

especificidades do ambiente. A arquitetura OSA-CBM descreve as informações e o fluxo de dados dos seis módulos especificados, entretanto a comunicação entre os módulos não foi especificada pela arquitetura. Pesquisas para a criação de *middlewares*⁴ de comunicação utilizam XML, CORBA ou RMI como ferramentas de desenvolvimento.

A ausência de padrões para a troca de informações entre a planta e os sistemas de manutenção foi o fator que desencadeou a formação da organização MIMOSA (*Machinery Information Management Open Standards Alliance*) (MITCHELL, 1998) e subsequente desenvolvimento do MIMOSA-OSA-EAI (*Open Systems Architecture for Enterprise Application Integration*).

A arquitetura OSA-EAI é uma extensão da MIMOSA (MATHEW, 2006b), representando uma plataforma baseada em relacionamento, cujo núcleo do modelo conceitual CCOM (*Common Conceptual Object Model*) é a implementação de um esquema denominado CRIS (*Common Relational Information Schema*). O MIMOSA-CRIS fornece um esquema de implementação que permite que a informação vinda de diferentes sistemas possa ser comunicada. Esta integração é possível através da descrição em formato XML. O XML é um formato relacional comumente utilizado na maioria dos sistemas de banco de dados.

As especificações técnicas e conceituais da MIMOSA estão disponibilizadas em <http://www.mimosa.org>. A arquitetura MIMOSA contribui principalmente para as estratégias de manutenção colaborativa, integração de informação e interoperabilidade de sistemas. A manutenção colaborativa possibilita que vários usuários possam colaborar em uma mesma atividade de manutenção. Para isso a integração de diferentes perfis de usuários e sistemas deve ser considerada. Entretanto a MIMOSA não oferece suporte a visibilidade da informação

⁴ *Middleware* no campo da computação distribuída, é um programa de computador que faz a relação entre o *software* e demais aplicações. É utilizado para mover ou transportar informações e dados entre programas de diferentes protocolos de comunicação, plataformas e dependências do sistema operacional. Seu objetivo é mascarar a heterogeneidade e fornecer um modelo de programação mais produtivo para os programadores de aplicativos.

dos estágios do ciclo de vida BoL (*Begin of Life*) e EoL (*End of Life*) oriundos de sistemas CAx. Ou seja, modelos de projeto de produto e processos de reuso e descarte de componentes não são contemplados na arquitetura.

A OSA-CBM foi desenvolvida utilizando a MIMOSA-CRIS, como núcleo da infraestrutura arquitetural para comunicação da informação. Isto possibilitou a integração dos dados de monitoramento de condições com sistemas de gerenciamento de recursos da manutenção. A OSA-CBM (*Open System Architecture for Condition Based Maintenance*) (PROVAN, 2003) divide os sistemas CBM em sete módulos, conforme Figura 4.

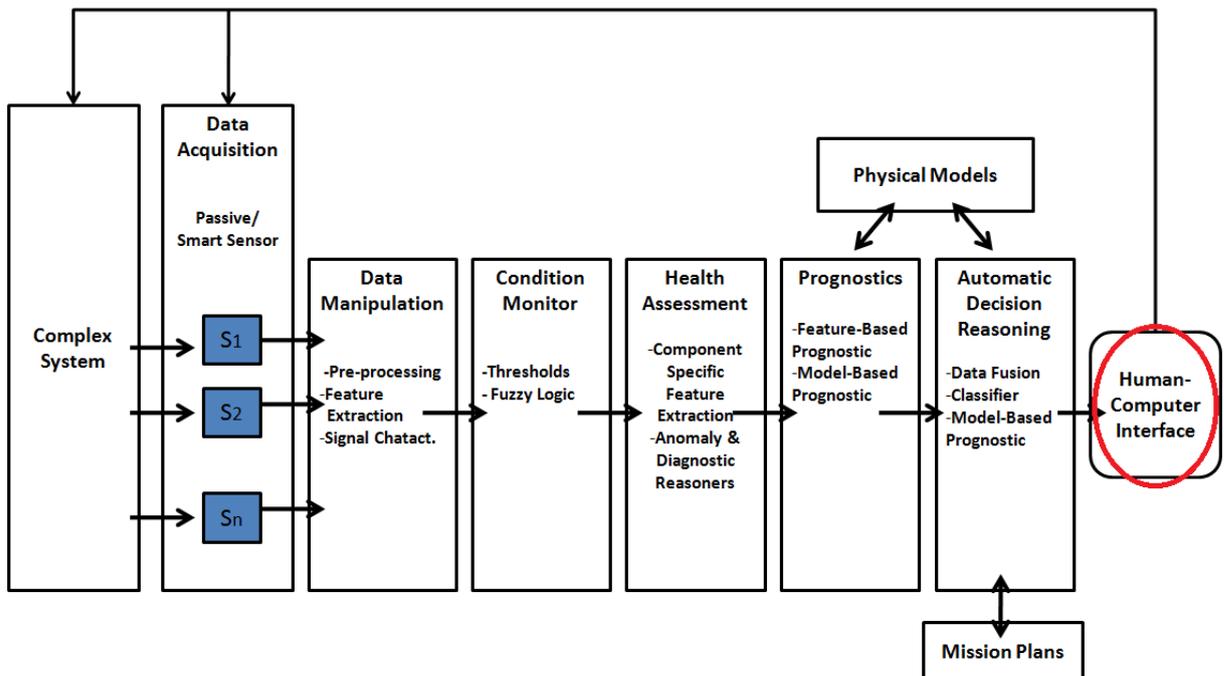


Figura 4 Arquitetura OSA-CBM (LEBOLD, 2001).

O módulo de aquisição de dados é onde às informações são disponibilizadas pelos sensores. Em seguida o módulo de manipulação processa os sinais e extrai as características. Desta forma, é possível monitorar os sinais, função esta delegada ao módulo de

monitoramento de condição, que pode emitir avisos caso o limiar ultrapasse um valor especificado, por exemplo, a temperatura ultrapasse um valor máximo permitido.

O módulo de avaliação da saúde do equipamento recebe os dados do módulo de monitoramento e determina o nível de degradação. Este módulo também analisa anomalias e realiza diagnóstico de falhas a partir de informações recebidas dos módulos anteriores.

O módulo de prognóstico prediz a condição futura do sistema ou componente monitorado. O módulo de tomada de decisão recebe os dados de prognóstico e sugere ações de manutenção ou alternativas de como o sistema deve funcionar até completar a função que está executando.

Observando a Figura 4 e sendo esta Tese uma proposta para o uso de interfaces mistas em operações de manutenção, entende-se que as contribuições deste trabalho focam-se, principalmente, no módulo *Human-Computer Interface* (conforme destacado em vermelho na figura) e conseqüentemente auxiliam na tomada de decisão. Na revisão da literatura a respeito dos padrões descritos na Tabela 2, não são mencionadas questões referentes a interfaces de visualização.

2.2.1.2 PLATAFORMAS

As plataformas aqui apresentadas consistem em sistemas de *software*, *hardware* e tecnologias que oferecem diversos tipos de serviços. As plataformas pesquisadas podem ser classificadas como: proprietárias, educacionais e pertencentes a projetos. Abaixo são descritas as mais citadas durante a revisão do estado da arte.

A PHD (*Prognostic and Health Management*) é uma plataforma de *hardware* e *software* para realização de prognóstico distribuído desenvolvido para veículos da NASA. Esta plataforma proprietária é descrita em (BYINGTON, 2009) e possui técnicas de

diagnóstico e prognóstico implementadas em linguagem de baixo nível e usadas para detectar e prever comportamentos anormais.

Entre as plataformas pertencentes a projetos citam-se WSDF (*Web-Services based e-Diagnostics Framework*) (HUNG, 2003) e PROTEUS (BANGEMANN, 2006). O WSDF foca no aperfeiçoamento dos sistemas de diagnóstico remoto através de mecanismos de integração automáticos de informações de diagnóstico pela internet.

O PROTEUS, resultante de um projeto europeu, visa à integração vertical de aplicações no domínio da manutenção remota em instalações industriais. O principal objetivo da plataforma é fornecer interoperabilidade e cooperação destas aplicações dentro do mesmo ambiente. Esta plataforma busca oferecer uma única descrição do equipamento, através de uma arquitetura genérica (baseada em tecnologias de serviço *Web*) e modelos consistentes de componentes heterogêneos. A integração é baseada na cooperação e execução dos processos executados distribuídamente em plataformas heterogêneas, comunicando-se através da internet.

Quanto a soluções em plataformas acadêmicas, tem-se um dos primeiros projetos na área de manutenção inteligente, desenvolvido nos EUA sob coordenação do professor Jay Lee, intitulado *Intelligent Maintenance System (IMS)* (LEE, 2003) (LEE, 2009b). Este sistema possui uma plataforma de *hardware* composta por um elemento núcleo denominado *WatchdogAgent* que possibilita um prognóstico de funcionamento do equipamento (DJURDJANOVIC, 2003). Devido a esta plataforma ser voltada para uso acadêmico e terem sido estabelecidos termos de cooperação entre a UFRGS e IMS-CENTER, esta solução foi adotada dentro do escopo de um projeto entre a Petrobrás, a UFRGS e o IMS-Center.

Um dos objetivos desta plataforma é fornecer a transformação dos dados brutos para um formato descrito em XML passível de descrever diversos tipos de dados. Uma vez

disponíveis estas informações na rede, vários usuários dispersos em diferentes localizações geográficas podem compartilhar a mesma informação.

Além disso, o *Watchdog Agent* possui um conjunto de ferramentas (implementações em *software*) para o processamento de sinais, a extração de características, o cálculo de desempenho, a predição de desempenho e o diagnóstico de saúde dos equipamentos. Estas ferramentas constituem o sistema da plataforma *Watchdog*.

Outras plataformas acadêmicas interessantes ao contexto dessa abordagem são: o PROMISE (**P**ROduct lifecycle **M**anagement and **I**nformation tracking using **S**mart **E**MBEDDED systems) e o DYNAMITE (Dynamic Decision in Maintenance).

O principal objetivo do PROMISE (KIRITSIS, 2007) foi desenvolver uma nova geração de rastreamento de informações do produto e um sistema de gerenciamento de fluxo dessa informação durante todo ciclo de vida do produto. O sistema desenvolvido pelo projeto permite que todos os atores envolvidos (gerenciadores, projetistas, operadores de manutenção e serviços, recicladores e etc) possam rastrear, gerenciar e controlar as informações do produto em qualquer fase, de qualquer lugar a qualquer momento. Para este propósito foi desenvolvido o dispositivo PEID (*Product Embedded Information Devices*).

Esse conceito de auto identificação/processamento do dispositivo PEID, surge a partir da disseminação e baixo custo dos dispositivos RFIDs (*Radio-Frequency IDentification*). A importante contribuição do PROMISE foi à descrição de um modelo de dados do produto baseado em conhecimento denominado PDKM.

O modelo PDKM (*Product Data and Knowledge Manager*) (CASSINA, 2006) (CASSINA, 2008a) desenvolvido no contexto do projeto PROMISE, descrito em UML, foca na representação da informação a respeito dos itens do produto nos diversos estágios do ciclo de vida. O PDKM é capaz de identificar e rastrear cada componente físico do produto (durante a montagem/desmontagem) e descrever características de uso e operação do

equipamento durante o ciclo de vida do produto. A representação em UML deste modelo apresenta uma descrição completa e sucinta das informações do produto. Comparado aos modelos fornecidos pela arquitetura MIMOSA, o PDKM é menos complexo em sua descrição e apresenta informações sobre os estágios BoL e EoL do produto (CASSINA, 2008b).

O DYNAMITE (HOLMBERG, 2005), é outro projeto europeu desenvolvido paralelamente ao PROMISE, cujo objetivo foi criar uma infra-estrutura para tecnologias de monitoramento móveis. A criação de novos dispositivos que possuam avanços nas capacidades de decisão dos sistemas, incorporando sensores e algoritmos, é outra meta deste projeto. As principais contribuições deste projeto são: telemetria *wireless*, histórico de inteligência local e instrumentação *on-line*.

Por fim, cita-se a plataforma TELMA (LEGER, 2004) (YU, 2003) desenvolvida por professores e pesquisadores que desejavam ter à sua disposição uma plataforma de treinamento nas áreas de manutenção e tele-manutenção. A plataforma foi criada para uso local em atividades de treinamento, uso remoto via internet para operações em serviços industriais (tele-manutenção), e uso de ensino e aprendizagem (para suporte a cursos em manutenção) (MULLER, 2008a). Em nenhuma das plataformas, referidas anteriormente e amplamente citadas na literatura, aspectos relacionados a interação homem-máquina foram abordados.

2.2.1.3 SISTEMAS

Em relação aos sistemas desenvolvidos para manutenção inteligente serão apresentados: TEMIC, RIMFDS, SIMAP e IMS.

O TEMIC (GARCIA, 2004) é um sistema que permite a manutenção tele-colaborativa. Sua característica principal é a implementação de uma arquitetura em redes neurais chamada RRBF (*Recurrent Radial Basis Function*) para predição de falha e diagnóstico de dados.

O RIMFDS (*Real-time multiple fault diagnostic system*) é um sistema inteligente projetado para dinâmicas complexas tais como aviões, naves espaciais e plantas de energia nuclear (BAE, 2005). Este sistema é baseado em multi-processamento usando redes neurais artificiais hierárquicas. Os módulos do RIMFDS incluem modelos de redes neurais para diagnóstico, modelos numéricos simples para previsão de saúde dos equipamentos, módulo de comunicação para sincronização de processos e cooperação entre modelos.

O SIMAP (GARCIA, 2004) é um sistema de manutenção preditiva que também utiliza técnicas de inteligência artificial. Este sistema leva em consideração as informações de entrada em tempo real oriundos de diversos sensores e outras fontes de informação para tentar detectar possíveis anomalias no comportamento normal esperado. A detecção de anomalias permite um diagnóstico prévio e possibilita o planejamento de ações de manutenção. O SIMAP possui: modelos de redes neurais para detecção de falhas; sistemas especialistas para diagnóstico; e algoritmos genéticos para agendamento das tarefas de manutenção.

Por fim, o sistema IMS do *WatchdogAgent*, apresentado na seção anterior, é descrito. Este sistema é composto por uma *toolbox* implementada em MATLAB (KOC, 2001) (LEE, 2001) e é fornecido juntamente com a plataforma acadêmica IMS citado na seção anterior. Este sistema consiste em algoritmos computacionais de prognóstico embarcados e um conjunto de ferramentas em *software* para prever a degradação dos dispositivos e sistemas (DJURDJANOVIC, 2003). O cálculo de degradação é baseado em leituras de múltiplos sensores que medem as propriedades críticas do processo ou máquina. Sendo a plataforma IMS adotada como ferramenta de manutenção inteligente, este sistema será detalhadamente descrito no capítulo 6.

A Tabela 3 resume em termos de contribuições as ferramentas discutidas na seção 2.2.1. Aspectos de contribuição não identificados na tabela não significam não existentes, no entanto não foram encontrados nos trabalhos disseminados a respeito das ferramentas MI.

Tabela 3 Resumo de ferramentas para manutenção.

| | Manutenção Remota | Manutenção Colaborativa | Manutenção Preditiva |
|--|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1) Padrões | | | |
| MIMOSA | * | ++ | * |
| OSA-CBM | * | * | ++ |
| SEMATECH | ++ | -- | * |
| 2) Plataformas | | | |
| arquitetura PHM | * | * | ++ |
| plataforma WSDF | ++ | ++ | * |
| plataforma PROTEUS | ++ | ++ | -- |
| plataforma IMS | * | * | ++ |
| projeto PROMISE | * | -- | -- |
| projeto DYNAMITE | ++ | ++ | -- |
| plataforma TELMA | ++ | ++ | ++ |
| 3) Sistemas | | | |
| sistema TEMIC | ++ | ++ | ++ |
| sistema RIMFDS | ++ | * | -- |
| sistema SIMAP | * | * | ++ |
| sistema IMS | * | * | ++ |
| Legenda: | | | |
| ++ → maiores contribuições -- → menores contribuições * → não identificado | | | |

Ao analisar a tabela é importante atentar que manutenção remota refere-se às soluções que contemplam: aspectos de tecnologia da informação, comunicação sem fio e tecnologias da Internet, onde os usuários podem logar-se de qualquer lugar em qualquer dispositivo que tenha acesso a Internet. Uma vez conectado, o usuário poderá controlar, configurar, diagnosticar, monitorar e analisar as informações.

A manutenção colaborativa por sua vez busca implementar uma infra-estrutura que conecte sub-sistemas e atores dispersos geograficamente através de redes Internet. A plataforma resultante permite a cooperação entre diferentes atores humanos, diferentes áreas da empresa (produção, manutenção, administração) e diferentes companhias (fornecedores, clientes).

A manutenção preditiva equivale a manutenção inteligente, ou a manutenção baseada em condição (CBM). Os seja, soluções que fornecem a predição de comportamento da máquina. É importante notar que os trabalhos encontrados relacionados à manutenção preditiva (inteligente) estão predominantemente inseridos no cenário internacional. Além disso, cabe frisar que a inexistência técnicas virtuais de apoio a estes sistemas ainda são comuns na maioria das soluções MI.

2.3 REALIDADE MISTA

A Realidade Virtual, Mista e Aumentada surgiu em meados dos anos 60 a partir dos avanços na área de Computação Gráfica e tornou-se uma das principais ferramentas de visualização de sistemas (KIRNER, 2007). Diversos são os conceitos associados a estes temas, alguns são definidos por Milgram (MILGRAM, 1994a) (MILGRAM, 1994b) conforme Figura 5.

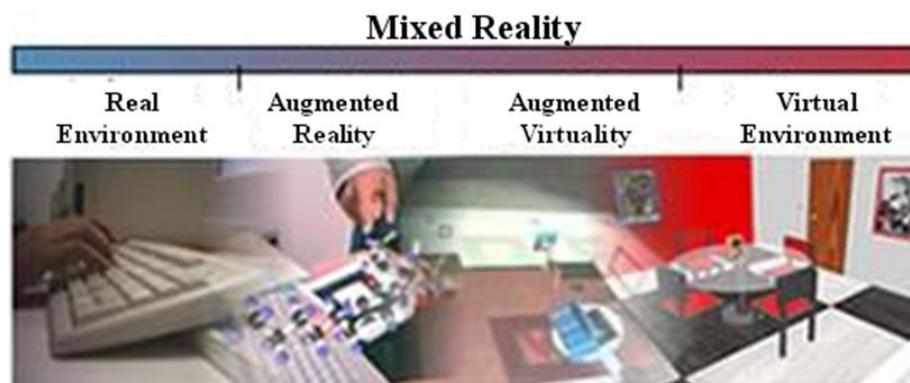


Figura 5 Virtualidade Contínua – adaptado de Milgram (MILGRAM, 1994a)

Segundo Kirner (2007) a realidade virtual (*Virtual Reality* – VR) é “uma interface avançada para aplicações computacionais, onde o usuário pode navegar e interagir, em tempo real, em um ambiente tridimensional gerado por computador, usando dispositivos multisensoriais”.

A realidade mista ou misturada (*Mixed Reality* – MR), uma das áreas da realidade virtual, é a sobreposição de objetos virtuais, gerados por computador, no ambiente físico, mostrada ao usuário, em tempo real, com o apoio de algum dispositivo tecnológico. A realidade misturada apresenta duas modalidades: realidade aumentada (RA) e virtualidade aumentada (VA) (KIRNER, 2007).

A realidade aumentada é a inserção de objetos virtuais no ambiente real utilizando-se um dispositivo. Na RA, existe a predominância do mundo real e os objetos virtuais são manipulados neste ambiente (KIRNER, 2007).

A virtualidade aumentada é a inserção de elementos reais no mundo virtual. A interface permite ao usuário interagir com o ambiente virtual. Na virtualidade aumentada tem-se o predomínio do mundo virtual e na realidade aumentada existe a predominância do ambiente real (KIRNER, 2007).

Assim, complexas tarefas de manutenção, montagem e desmontagens de máquinas são um excelente domínio para as aplicações de realidade virtual, mista e aumentada (BARATOFF, 2004) (APPEL, 2003) (SCHOENFELDER, 2008). Especialmente para atividades de manutenção, onde se necessita do predomínio do ambiente real, o uso de realidade aumentada pode apresentar ganhos significativos (HASSAINE, 2009).

A visualização de sistemas com suporte a realidade mista representam o fornecimento de instruções contínuas e autônomas apresentadas no local certo e na hora certa durante a atividade de manutenção (HARINGER, 2002) (JAYARAM, 2007) (LECAKES, 2008).

No contexto da realidade virtual, ferramentas de apoio aos sistemas de automação industrial tais como: ferramentas CAD/CAE/CAM com prototipagem virtual de produtos (GEORGEL, 2009) e manufatura digital, começam a crescer em importância nas aplicações industriais (HENDERSON, 2009).

Atualmente, termos como "*downtime*" e "tempo de comercialização" são comumente utilizados na indústria quando se referencia a busca pelos requisitos de tempo, qualidade e custo (MOORE, 2006). O tempo de comercialização dos produtos bem como o tempo de parada (*downtime*) próximo de zero, são determinantes para o sucesso ou insucesso das atividades envolvidas (LI, 2004). Nos dois casos são verificadas a utilização de técnicas de realidade virtual como meio de atingir estas metas.

Entretanto, ainda não é comum a utilização de realidade mista como meio de interface homem-máquina em atividades de manutenção (SCHWALD, 2003) (SONG, 2009). A não utilização, no cotidiano da indústria, de técnicas de visualização avançadas tais como realidade mista se deve muitas vezes à falta de ferramentas que facilitem a implementação deste tipo de tecnologia. A maioria das soluções existentes é desenvolvida para aplicações específicas e utilizada principalmente em grandes projetos da indústria automotiva, aérea e naval, onde a produção é em linha de montagem.

A falta de conhecimento sobre as vantagens e limitações da RM, o fato de serem aplicadas na maioria das vezes por grandes empresas e a falsa impressão de alta complexidade e alto custo de implementação são outros fatores que dificultam a disseminação do uso desta tecnologia. No entanto, o fato é que os ambientes interativos, imersivos e multimídia estão invadindo as escolas, casas, cinemas, teatros e indústrias diariamente (NAVAB, 2004) (OLIVEIRA, 2007) (SHAF, 2009). Conseqüentemente, não se pode negar que a rápida emergência dessas tecnologias caracteriza uma vantagem em termos de visualização aberta, flexível e interativa e representam uma tendência natural já adotada, se não pela indústria, pelos fabricantes de sistemas CAx.

Entre as ferramentas para aplicação de técnicas de realidade mista encontram-se bibliotecas, linguagens e plataformas que podem ser utilizadas de forma individual ou integrada. Algumas das principais ferramentas são listadas na Tabela 4.

Tabela 4 Ferramentas para Realidade Mista.

| Ferramentas |
|-------------------------------------|
| ARToolKit (KATO, 2000) |
| ARToolKitPlus (WAGNER, 2004) |
| ARTag (FIALA, 2005) |
| DART (MACINTYRE, 2004) |
| OSGART (OSGART, 2006) |
| OpenCV (OPENCV, 2000) |
| OpenInterface (OPENINTERFACE, 2003) |
| OpenGL (OPENGL, 1997) |
| VRML (AMES, 1997) |
| X3D (X3D, 2006) |
| OpenSceneGraph (OSG, 2000) |

O ARToolKit (KATO, 2000) é um *software* livre utilizado para o desenvolvimento de aplicações de Realidade Aumentada e opera através de técnicas de visão computacional, processamento de imagens e programação para rastreamento de cenas baseado em marcadores⁵.

A ARToolKitPlus (WAGNER, 2004) é uma biblioteca baseada na ARToolKit. Foi desenvolvida pela *Graz University of Technology*. Esta biblioteca apresenta algumas otimizações, como, por exemplo, possibilidade de se utilizar computações de ponto fixo ao invés de ponto flutuante, com o intuito de gerar aplicações eficientes para dispositivos móveis, tais como PDAs (*Personal Digital Assistants*) e *Smartphones*.

Os marcadores utilizados por esta biblioteca são semelhantes aos da ARToolKit, com a diferença de que o desenho no interior do quadrado de bordas pretas consiste em uma codificação do identificador do marcador. Essa codificação possibilita que o usuário utilize até 512 diferentes marcadores, diminuindo a ocorrência da confusão entre os marcadores.

Uma característica importante presente na ARToolKitPlus é a utilização da técnica de limiar adaptativo, a qual, permite o ajuste automático do sistema de detecção dos marcadores conforme as alterações sofridas pela a luz do ambiente, capturado pela câmera.

⁵ Etiquetas impressas colocadas no equipamento real para rastreamento e posicionamento dos elementos virtuais sobre a cena real.

A ferramenta ARTag (FIALA, 2005) é um sistema de detecção de marcadores baseado na biblioteca ARToolKit desenvolvida pelo *National Research Council of Canada*. O objetivo da ARTag foi resolver alguns problemas encontrados na ARToolKit, principalmente no processo de detecção de marcadores, tais como o problema do falso positivo "quando o sistema acusa a presença de um marcador, mas ele não existe"; o problema do falso negativo "quando o sistema não acusa a presença de um marcador, mas ele existe"; e o problema de confusão "quando o marcador no ambiente é um, e o sistema o identifica como sendo outro".

ARToolKit e o ARTag utilizam padrões para identificação dos marcadores, porém o ARTag compara códigos compostos de *zero's* e *um's*, ao invés de imagens como o ARToolKit, diminuindo o processamento requerido para sua identificação. Outra característica do ARTag é que ele detecta a presença de oclusão e trata o controle de luz, que são pontos falhos do ARToolKit.

A DART (*Designer's Augmented Reality Toolkit*) (MACINTYRE, 2004) foi desenvolvida como um conjunto de extensões do ambiente de programação multimídia *Macromedia Director* (atualmente Adobe Director), e é uma ferramenta para construção de conteúdos multimídia. A DART busca prover o desenvolvimento rápido em realidade aumentada, e foi desenvolvida pelo GVU - *Center Georgia Institute of Technology*. Esta ferramenta é composta por extensões do *Director* escritas na linguagem LINGO e *plugins* escritos na linguagem C++, e usa o ARToolkit como suporte para a captura de vídeo, rastreamento e para o processo de reconhecimento de marcadores.

Esta ferramenta é voltada para aplicações onde a mídia gerada por computador é diretamente integrada à percepção dos participantes. Ela suporta os sistemas operacionais *Windows* e *MacOSX*. Apesar de estar disponível para uso livremente, ela exige o Adobe Director, que é um *software* comercial.

A biblioteca OSGART (OSGART, 2006) combina funções de detecção e rastreamento de marcadores do ARToolKit com as funções para construção de modelos virtuais da biblioteca *OpenSceneGraph*. A OSGART apresenta alta qualidade na renderização dos objetos virtuais e permite a importação e exportação de arquivos gerados pelo *3D Studio Max* e *Maya*. Dentre as características da OSGART, tem-se: a facilidade de integração com vídeos; suporte a diferentes entradas de vídeo; suporte a técnicas de renderização de sombras; suporte a múltiplos marcadores; suporte a múltiplas tecnologias de *tracking* (ARToolkit, ARtoolkit Plus, ARTag); se constitui pelo paradigma da orientação a objeto possuindo suporte a várias linguagens de programação.

Intel Open Source Computer Vision Library (OPENCV, 2000), ou simplesmente, OpenCV, foi criado pelo grupo de desenvolvimento da Intel em 2000 e possui uma coleção de ferramentas para o desenvolvimento de aplicativos na área de Visão Computacional. A OpenCV possui módulos de processamento de imagens e vídeo I/O, estrutura de dados, álgebra linear, GUI básica com sistema de janelas independentes, controle de mouse e teclado, além de diversos algoritmos de visão computacional como filtros de imagem, calibração de câmera, reconhecimento de objetos, análise estrutural, entre outros.

A *Open Scene Graph* (OSG, 2000) é uma biblioteca gráfica para o desenvolvimento de aplicações gráficas de alto desempenho como simuladores de vôo, jogos de RV e visualização científica. A OSG é uma biblioteca multi-plataforma desenvolvida em C++, que permite aos programadores representar objetos em uma cena usando estruturas de dados de árvore, chamadas de grafos de cena.

A estrutura de grafos é usada para representar o mundo virtual. O nó raiz abrange o mundo virtual completo. Este mundo é quebrado em uma hierarquia de nós que podem representar grupos, propriedades de posicionamento, animação e definições de relações entre

objetos. As folhas dessa árvore contêm os próprios objetos, sua geometria e propriedades dos materiais.

Entre as principais vantagens da OSG destacam-se a portabilidade, a produtividade, a escalabilidade e o desempenho. Esta ferramenta é desenvolvida dentro da filosofia do *software* livre, e possui diversas versões adaptadas a cada nova necessidade que surgem nas aplicações gráficas. A OSG não dispõe de uma documentação da linguagem de descrição de cenas que sirva de referência para o programador, no entanto pode-se obter informações similares em outras ferramentas que possuem a mesma filosofia.

A VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) (AMES, 1997) é uma linguagem para modelagem de mundos virtuais em três dimensões. Assim como o HTML serve para desenvolver páginas *web*, a VRML serve para criar mundos 3D aos que acessam arquivos *wrl* utilizando navegador com *plugin* específico. A vantagem é que a navegação não limita-se a textos e imagens, o modelo 3D em *wrl* permite navegar e interagir com objetos tridimensionais.

A navegação se desenvolve de maneira intuitiva, uma vez que a forma de agir dentro do mundo virtual é similar à da vida real. Pode-se movimentar o objeto em todas as direções: esquerda e direita, para frente e para trás, para cima e para baixo. Pode-se lidar com os objetos de forma a tocá-los, arrastá-los e manipulá-los.

A biblioteca gráfica OpenGL (OPENGL, 1997) possui rotinas para construção de objetos, composição de transformações geométricas e controle de câmera. Esta biblioteca é dependente da utilização de uma linguagem de programação tal como: C/C++, Java ou Delphi e é comumente utilizada em aplicações de realidade virtual, mista e aumentada para a renderização de cenas.

OpenInterface (LAWSON, 2009) (SERRANO, 2008) faz uso de uma arquitetura de *software* baseada em componentes que possibilita conectar modalidades implementadas em

diferentes linguagens de programação. Cada componente é integrado e registrado na plataforma através da descrição de sua interface seguindo a definição CIDL (*Component Interface Description Language*), a qual é baseada em XML.

Por fim, o X3D (X3D, 2006) é um padrão aberto para distribuir conteúdos de realidade virtual em 3D, em especial pela Internet. Este combina tanto dados geométricos como descrições de comportamento instantâneas em um arquivo que tem vários formatos de transmissão, sendo que o padrão de codificação ideal é o XML. O X3D pode ser utilizado para modelagem, animação, interação, interoperabilidade com outras tecnologias da *web*, treinamento, visualização científica, entre outros. O XML foi adotado como sintaxe para o X3D por resolver um grande número de problemas reais, tendo em vista que a sintaxe do VRML baseada em grafo de cena Open Inventor é algumas vezes complexa.

Nota-se que linguagens de marcação tipo XML (*eXtensible Markup Language*) são citadas em muitas ferramentas como formato de descrição. Isto se dá devido à possibilidade de compartilhamento e transmissão via Internet desses arquivos, uma vez que a sintaxe dominante na *web* tem sido a XML.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a revisão do estado da arte diversas lacunas foram identificadas no contexto das técnicas de visualização dos sistemas de manutenção. Um aspecto relevante é em relação às interfaces homem-máquina dos sistemas MI apresentados na seção 2.2. Os recursos de visualização das ferramentas MI mostraram-se graficamente "pobres", cabendo aos profissionais envolvidos interpretar os resultados. Esta característica exige conhecimento especialista para manipulação dos sistemas de manutenção inteligente.

Levando em consideração a idéia da abordagem, descrita na Figura 1 e 2: “um modelo que relacione informações virtuais com as informações de manutenção e de sistemas CAx”, buscou-se durante a revisão, padrões de manutenção que especificassem objetos relacionados aos modelos de projeto gerados na etapa inicial do ciclo de vida do produto (BoL - dados CAx). O modelo PDKM (CASSINA, 2006), descrito em UML, é uma solução que representa a informação a respeito dos itens do produto nos diversos estágios do ciclo de vida. O PDKM é capaz de identificar e rastrear cada componente físico do produto (durante a montagem/desmontagem) e descrever características de uso e operação do equipamento durante o gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM).

Identificada “a integração e fluxo da informação” bem como “a definição dos dados” como os gargalos para a implementação da interface mista de visualização, esta abordagem utiliza conceitos da arquitetura OSA-EAI para soluções de comunicação e integração; e utiliza o modelo PDKM para a descrição dos dados envolvidos no processo de visualização mista de operações de manutenção. A interface foi projetada levando em consideração as necessidades apontadas em termos de visualização de dados de diagnóstico, planejamento e segurança para as atividades de manutenção.

No que se refere a ferramentas de realidade mista, os experimentos desta Tese, utilizaram o ARToolkit para rastreamento de cena; VRML e 3DXML para modelagem de elementos virtuais; C++ como linguagem de programação; OpenGL para renderização de cenas; Visual Studio como plataforma para o desenvolvimento do sistema (interface e funções); XML para descrição do modelo de relacionamento de dados heterogêneos; UML para descrição do modelo da abordagem. O capítulo 5 detalha estas tecnologias.

Por fim, tendo o referencial teórico sido apresentado o próximo capítulo apresenta os trabalhos relacionados ao uso de realidade mista em atividades de manutenção. São identificados aspectos positivos e negativos comparados a proposta desta Tese.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo descreve os trabalhos encontrados na literatura a respeito do uso de realidade mista em atividades de manutenção. Além disso, o capítulo pretende relacionar os trabalhos existentes com a abordagem aqui descrita e identificar as lacunas em relação à solução proposta. Embora não tenham sido identificados trabalhos diretamente relacionados ao uso de RM no gerenciamento da informação dos sistemas de manutenção inteligente, buscou-se neste capítulo apresentar aqueles que possuem maior relação com a abordagem proposta e que foram úteis para o desenvolvimento desta Tese.

3.1 O USO DE RM EM MANUTENÇÃO

Em aplicações na indústria, os trabalhos relacionados à realidade virtual, buscam auxiliar através de gráficos 2D, modelos 3D, simulações e animações, os mais variados tipos de processos industriais. O entendimento dos processos de montagem e desmontagem de máquinas e equipamentos, bem como as atividades de treinamento e projeto de componentes e máquinas são as aplicações mais discutidas na área de RV na indústria (MILGRAM, 1994a) (FIORENTINO, 2002) (SCHOENFELDER, 2008).

Em atividades de manutenção, a realidade mista, auxilia através da sobreposição de elementos virtuais sobre o equipamento real. No entanto, na maioria das vezes as informações virtuais de manutenção são criadas para casos específicos e não há modificações no modelo misto de acordo com as ações do operador na máquina. Ou seja, as soluções são estáticas e orientadas a casos particulares, não são soluções genéricas que possam ser aplicadas a diferentes tipos de ambientes/equipamentos.

A segurança no procedimento de manutenção, para a integridade física do usuário é outro propósito do uso de RM na indústria. Nestes casos, a realidade mista (RM) é utilizada como um meio de proporcionar ao utilizador uma interação segura e eficiente (NAKAJIMA, 2003).

Entre os principais projetos encontrados destacam-se: o projeto ARVIKA (FRIEDRICH, 2002), AMIRE (GRIMM, 2002) (TRASKBACK, 2004), STARMATE (SCHWALD, 2001), INT-MANUS (FOURSA, 2006), ULTRA (MAKRI, 2005a) (MAKRI, 2005b). Outros trabalhos citados são: STUDIERSTUBE (SCHMALSTEIG, 2002) (SZALAVÁRI, 1998), DWARF (WAGNER, 2001), SPACEDESIGN (FIORENTINO, 2002), ARBA (SCHOENFELDER, 2008) e AAR (QUARLES, 2008).

A maioria destas soluções utiliza HMD (*Head Mounted Display*) como dispositivo de visualização, comandos de voz para interação com o sistema virtual e sobreposição de elementos virtuais para visualização de guias de instruções. A Figura 6 exemplifica o uso de elementos virtuais sobrepostos na planta industrial para auxílio à operação da planta.

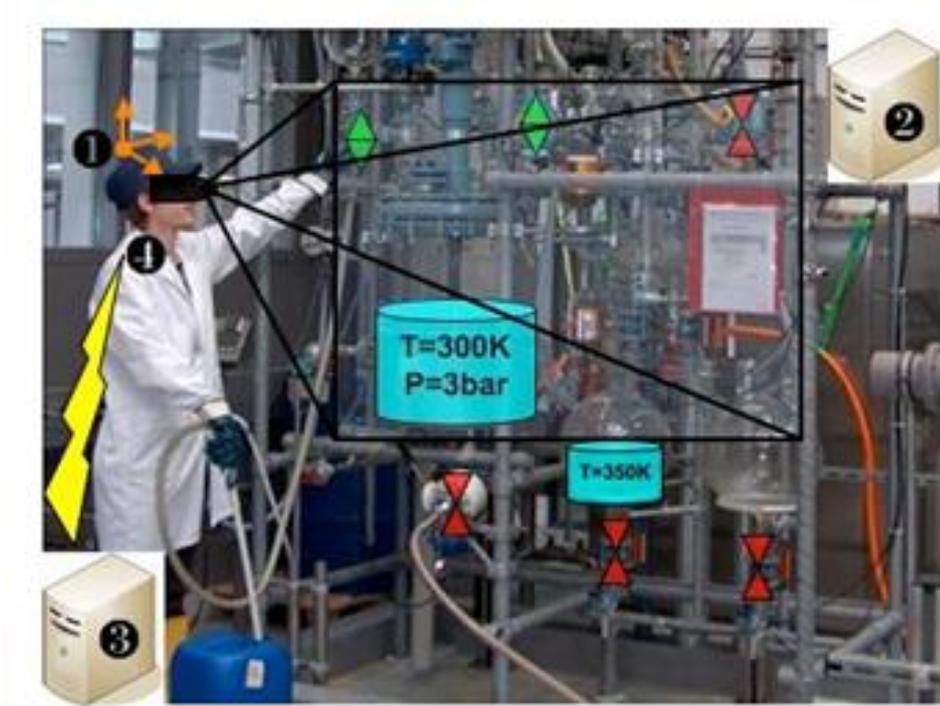


Figura 6 Realidade Mista para auxílio em operações na planta (PERRITAZ, 2008).

A Figura 6 foi extraída do site <http://la.epfl.ch/page-53085-en.html>, referente ao projeto “*Development of an augmented reality system*” orientado por Damien Perritaz (PERRITAZ, 2008). No entanto não foram encontradas publicações referentes ao projeto, apenas uma descrição resumida sobre seus objetivos.

O ARVIKA (*Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service*) é um dos mais citados projetos de realidade aumentada e foi liderado pela *Siemens* (FRIEDRICH, 2002) (WEIDENHAUSEN, 2003). Resumidamente, o principal objetivo do ARVIKA foi utilizar tecnologias de realidade aumentada para dar suporte dirigido à aplicação e orientado ao usuário em procedimentos de trabalho tais como: desenvolvimento, produção e serviços de complexos sistemas. Entretanto, as descrições a respeito do gerenciamento da informação foi um dos tópicos de pesquisa descrito como em andamento no projeto, não sendo encontrado nenhum tipo de detalhamento.

Os serviços de manutenção apresentados pela interface do ARVIKA são baseados no histórico de equipamentos. Não foram mencionadas técnicas preditivas de manutenção neste projeto. São armazenados também guias de ações com auxílio de operadores para cada falha armazenada no histórico de manutenção. A Figura 7 apresenta o *hardware* utilizado e o sistema de visualização deste projeto.



Figura 7 Projeto ARVIKA (FRIEDRICH, 2002).

Diferentemente do ARVIKA, o AMIRE (*Authoring Mixed Reality*) (GRIMM, 2002) propôs flexibilidade e reusabilidade, na solução apresentada, através de um *framework* baseado em componentes onde o paradigma orientado a objetos esconde a complexidade da programação. Este projeto descreveu um modelo baseado em diagramas de caso de uso, os quais descrevem o relacionamento entre atores e tarefas envolvidas no processo de produção em interfaces mistas. Dois estudos de caso foram apresentados: o treinamento em uma refinaria de petróleo conforme Figura 8 (GRIMM, 2002); e uma visita guiada em museu.



Figura 8 Projeto AMIRE aplicado à indústria petrolífera (GRIMM, 2002).

Uma combinação de várias tecnologias gráficas e bibliotecas são usadas no projeto AMIRE. Alguns dos aspectos relevantes, do AMIRE, para a nossa abordagem são: interface de componentes única e bem definida; integração de diferentes sistemas de *tracking* (marcadores do ARToolKit); integração de bibliotecas gráficas 3D de código aberto (OpenGL, OpenSceneGraph) e a biblioteca gráfica 2D (glGUI); implementação baseada em XML para exportar informações de componentes; diversidade de dispositivos de *hardware* portáteis (TabletPC, PDA) para os usuários finais.

Sendo a proposta do AMIRE o uso de interface mista por usuários não especialistas em programação, não são explorados na documentação a implementação em baixo nível do *framework*, descrevendo “como” os dados são relacionados. Além disso, não foram encontradas referências sobre a aquisição de dados oriundos de sistemas de manutenção, nem mencionado questões no contexto da extração da informação, ou seja, quais informações trazer e utilizar no ambiente de visualização.

O STARMATE (*System using Augmented Reality for Maintenance, Assembly, Training and Education*) (SCHWALD, 2001), consistiu em um consórcio multidisciplinar entre engenheiros, cientistas da computação, profissionais especialistas em aeronaves e em manutenção nuclear que pesquisavam novas técnicas de visualização.

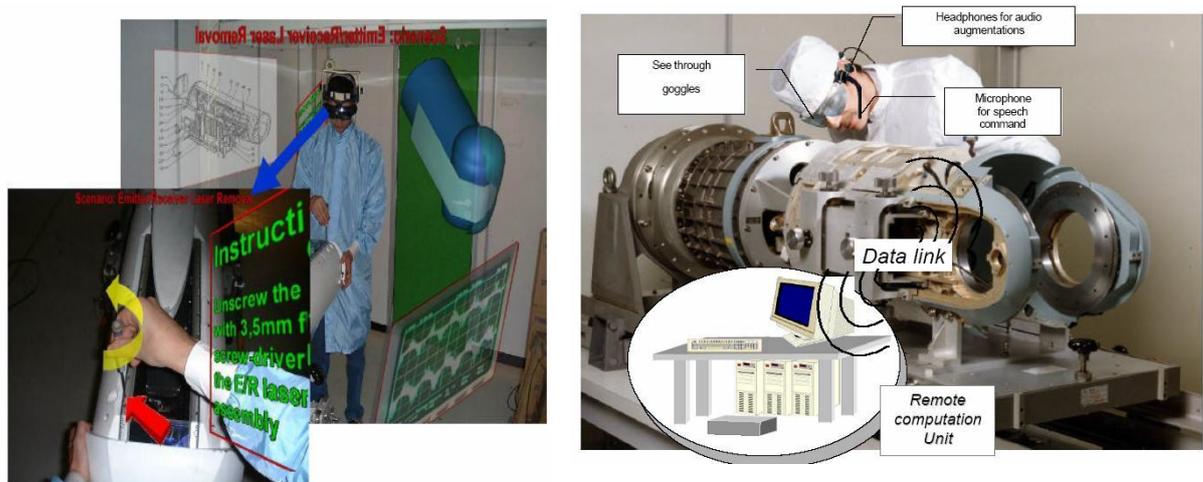


Figura 9 Projeto STARMATE (SCHWALD, 2001).

O objetivo do STARMATE foi desenvolver um protótipo demonstrativo para auxílio às tarefas de manutenção de componentes complexos, fornecendo: uma ferramenta de apoio na execução de intervenções de manutenção; um meio de treinamento usando modelos reais. O projeto explorou a arquitetura de *hardware* necessária para o desenvolvimento da proposta, no entanto não descreveu os modelos de dados envolvidos, questões de implementação da interface, bem como o gerenciamento da informação.

Em termos de soluções em arquiteturas de *hardware* e contribuições na área de comunicação, dois grandes projetos são freqüentemente citados. O ULTRA (*ULTRA Light Augmented Reality Mobile System*) e o INT-MANUS (*Intelligent Networked Manufacturing System*). O projeto ULTRA (MAKRI, 2005a) (MAKRI, 2005b) desenvolveu um sistema de *hardware* leve, compacto e portátil que aplica técnicas de realidade aumentada em PCs de mão (*Tablets e PDAs*). A maior contribuição deste projeto foi desenvolver soluções para conexão *wireless* e suporte remoto integrado por telefones móveis. As aplicações deste projeto foram estendidas em diferentes domínios, desde a manutenção de máquinas até aplicações de construção, produção e educação.

O sistema INT-MANUS (SCHLEGEL, 2007) (FOURSA, 2008) desenvolveu uma plataforma de *hardware* denominada SCCP (*Smart Connected Control Platform*). A SCCP é descrita por uma arquitetura baseada em agentes, aberta e distribuída, cuja principal contribuição está nas questões de flexibilidade e adaptabilidade. A arquitetura fornece três interfaces específicas: interface baseada em *web*, interface para dispositivos móveis e interface para os sistemas de realidade virtual. A descrição da arquitetura é dividida em duas camadas que integram máquinas, robôs e outros dispositivos e serviços que são conectados via protocolo TCP-IP.

Entre os *frameworks* tem-se o STUDIERSTUBE, usado para o desenvolvimento de aplicações em realidade aumentada móvel, colaborativa e onipresente (SCHMALSTIEG, 2002). O STUDIERSTUBE busca o gerenciamento de interfaces 3D no sentido de resolver como usar mídia tridimensional interativa em um ambiente de trabalho no qual uma variedade de tarefas é executada simultaneamente. O núcleo do sistema STUDIERSTUBE é a RA colaborativa.

Outra solução é o DWARF (*Distributed Wearable Augmented Reality Framework*) (WAGNER, 2001). Este *framework* foi desenvolvido dentro do escopo de uma dissertação de

mestrado. Segundo os autores uma das tarefas cruciais da RA é a estimação da posição e orientação relativa do usuário. Estes valores têm que ser determinados com alta precisão, altas taxas de atualização e baixo *delay* para capacitar a precisa sobreposição do virtual sobre o real. Soluções de *tracking* óptico e por detecção de marcadores são algumas das propostas do *framework*. A forte contribuição deste trabalho é voltada à técnicas de rastreamento, para combinar a informação de movimento relativo com a detecção do marcador.

O ARBA (*Augmented Reality Building Acceptance*) (SCHOENFELDER, 2008) é um estudo recentemente aplicado à indústria automobilística onde foram comparados através de três dispositivos de RA (AR-Planar, HMD e TabletPC), a construção dos produtos com os modelos de projeto CAD.

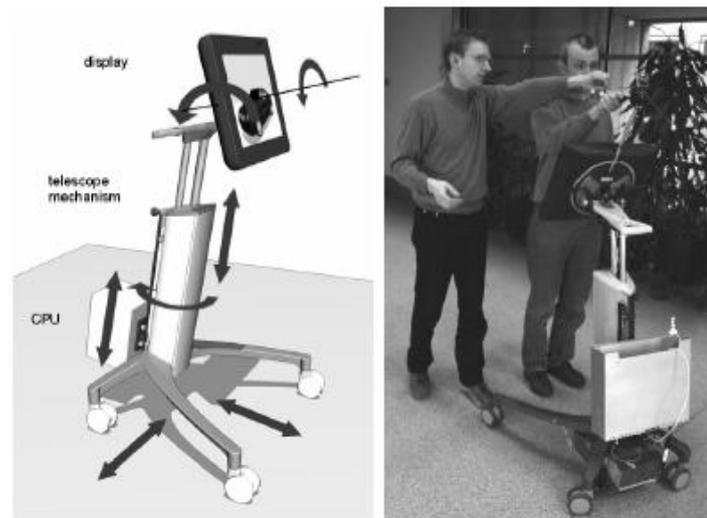


Figura 10 Sistema ARBA (SCHOENFELDER, 2008).

Building Acceptance (SCHOENFELDER, 2008) definido por Schoenfelder, é o processo de comparação da documentação do modelo CAD com o produto efetivamente construído. Este tipo de técnica é similar a técnica X-Ray, cuja representação virtual interna do componente é sobreposta no equipamento real.

Não foram identificados, durante a revisão, detalhes a respeito do gerenciamento da informação em sistema de RM aplicados a manutenção. Neste sentido, buscou-se encontrar na

literatura, soluções de RM que contemplem a modelagem de diferentes formatos de dados. Neste sentido, a próxima seção apresenta aplicações de realidade mista no âmbito da integração de modelos heterogêneos.

3.2 A RM NO GERENCIAMENTO DE DIFERENTES MODELOS DE DADOS

Em Quarles (2008) é mostrado uma aplicação de realidade aumentada para treinamento em máquinas de anestesia usadas na área da medicina - AAM (*Augmented Anesthesia Machine*). Mesmo o estudo não sendo relacionado à manutenção, a técnica de multi- modelagem, utilizada no trabalho, pode ser aplicada a diferentes aplicações. Esta técnica baseia-se em descrições XML para relacionamento de diferentes dados.

Fishwick (2004) apresenta a técnica de multi-modelagem integrativa que permite que componentes de diferentes tipos de modelos possam ser relacionados uns aos outros através de interfaces homem-computador. Mesmo a técnica sendo aplicada a questões de simulação de interfaces, o conceito sobre *linkagem* de modelos através de ontologias descritos em (FISHWICK, 2004) e (PARK, 2005) foram úteis para o desenvolvimento do modelo relacional desta abordagem.

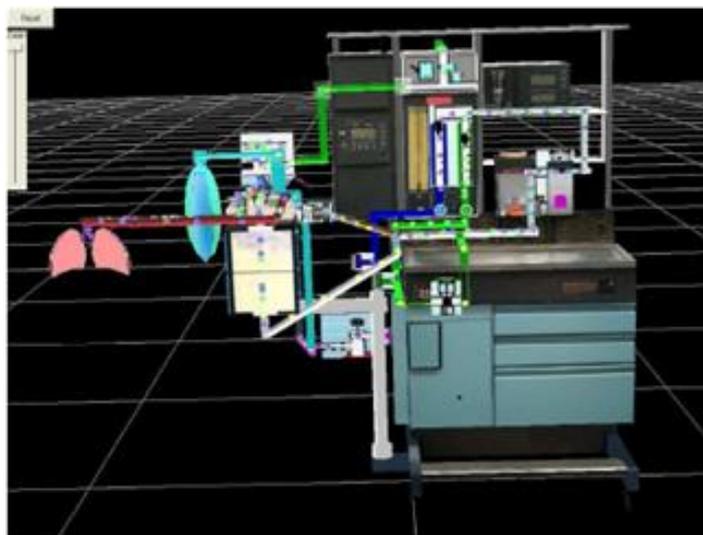


Figura 11 Sistema AAM (LOK, 2004).

Toro (2007) apresenta um sistema de manutenção industrial baseado em conhecimento propondo a plataforma UDKE constituída de quatro camadas (*User, Device, Knowledge and Experience* - UDKE). Este sistema foca principalmente na modelagem da informação propondo duas novas ontologias através da extensão do padrão SOUPA (*Standard Ontology for Ubiquitous and Pervasive Applications*) (CHEN, 2004): uma ontologia para modelagem da experiência do usuário chamada SOE (*Set of Experience Knowledge Structure*) (TORO, 2006) (TORO, 2007) e a ontologia AR para modelar ambientes de realidade aumentada usados para melhorar a experiência de manutenção.

A plataforma proposta é uma especificação em alto nível de abstração através de ontologias e não fornece descrições sobre modelos e dados de manutenção. Entretanto apresenta modelos conceituais úteis para o uso de realidade aumentada, através de dispositivos móveis, como maneira de melhorar a experiência do usuário.

O outro estudo, interessante no contexto da definição de modelos para integração de dados, foi discutido em (LECAKES, 2008) e (RUSSEL, 2009). Lecakes (2008) apresentou resultados parciais de um trabalho cujo objetivo foi mostrar as vantagens do uso de realidade virtual para integração de medidas oriundas de múltiplos sensores. O modelo definiu três tipos de dados como essenciais para a criação do ambiente de realidade virtual: dados gráficos (arquivos 2D), dados de medidas e dados funcionais. Os dados gráficos representam a estrutura física do sistema modelado; os dados de medidas são as leituras dos sensores; e os dados funcionais são resultado da análise das medidas. Apesar da integração de dados de múltiplos sensores estar dentro do escopo deste trabalho, somente modelos a respeito de sistemas de interfaces de realidade virtual foram abordados.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a revisão dos trabalhos relacionados ao uso de realidade mista ou aumentada em sistemas de manutenção, observou-se que para fins de diagnóstico e prognóstico, que são o foco da manutenção inteligente, poucas soluções são encontradas.

Nos trabalhos encontrados que utilizam realidade mista na manutenção, as técnicas de RM são utilizadas apenas para visualização. Não foram encontradas interfaces de visualização mista que contemplem o desenvolvimento de modelos para o gerenciamento da informação de dados CAD, de manutenção e virtuais.

Outro aspecto identificado, é que as soluções encontradas não apresentam alterações no conteúdo virtual em função dos dados do sistema de manutenção. Ou seja, uma vez criado o ambiente virtual este é armazenado e apresentado durante a execução das tarefas sempre que for solicitada a visualização. Ou seja, os modelos são estáticos voltados a aplicações específicas.

Sendo assim, constatou-se uma carência por soluções que apresentem modelos genéricos para integração de dados de manutenção inteligente e realidade mista. O desenvolvimento de uma abordagem baseada em modelo que possibilite a determinação dinâmica do conteúdo virtual de acordo com o estado das informações do sistema preditivo representa uma contribuição tanto ao contexto industrial quanto ao científico.

4 A METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia desenvolvida para a implementação de uma solução de gerenciamento e integração de dados de manutenção, dados CAx e dados virtuais, em interfaces mistas de visualização. Esta metodologia possibilita a descrição de um modelo conceitual para definição da abordagem proposta por esta Tese. A metodologia é representada na Figura 12 por um diagrama de atividades. Cada etapa possui um conjunto de funções que são executadas de forma paralela ou seqüencial. A metodologia é dividida em três etapas, cada uma descrita individualmente nas seções subseqüentes deste capítulo.

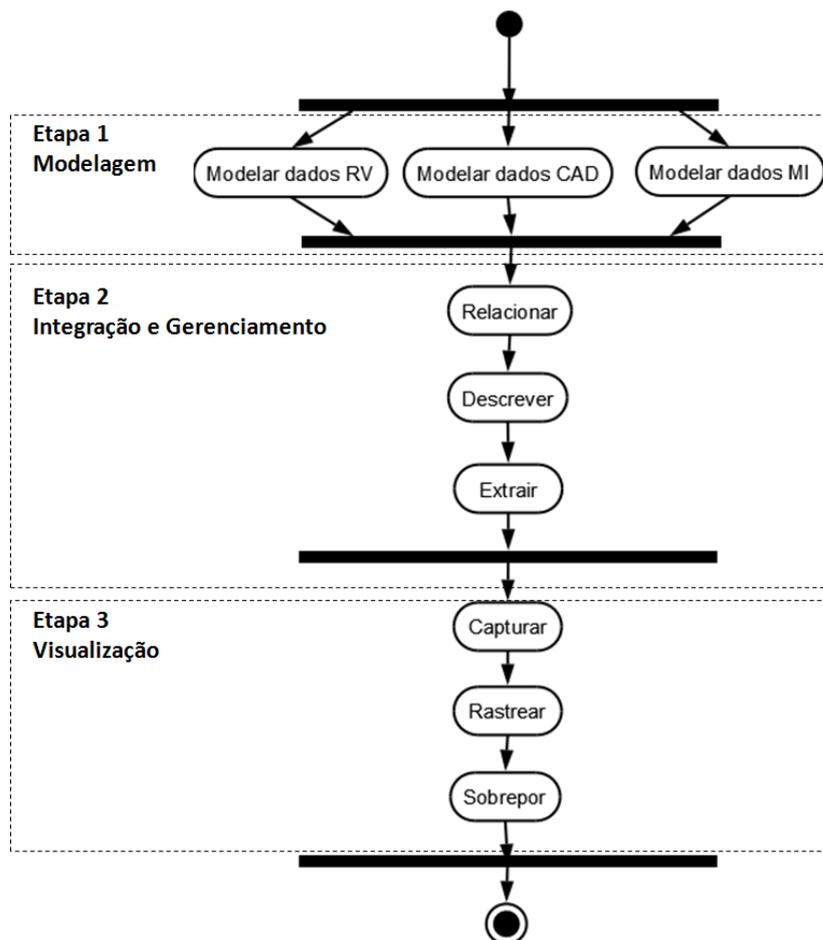


Figura 12 A metodologia.

4.1 ETAPA 1: MODELAGEM

A etapa de modelagem contempla três estágios. A modelagem CAx, que descreve a estrutura do equipamento. A modelagem virtual, na qual os modelos virtuais dos componentes, do equipamento, da planta e dos conteúdos tais como: textos, gráficos, modelos tridimensionais e recursos multimídia, são gerados. E a modelagem dos dados de manutenção. Esta última busca e organiza os dados gerados pelos sistemas de manutenção inteligente. A Figura 13 descreve a etapa de modelagem da metodologia, cujos retângulos representam os processos, os círculos os modelos e as setas o fluxo de dados.

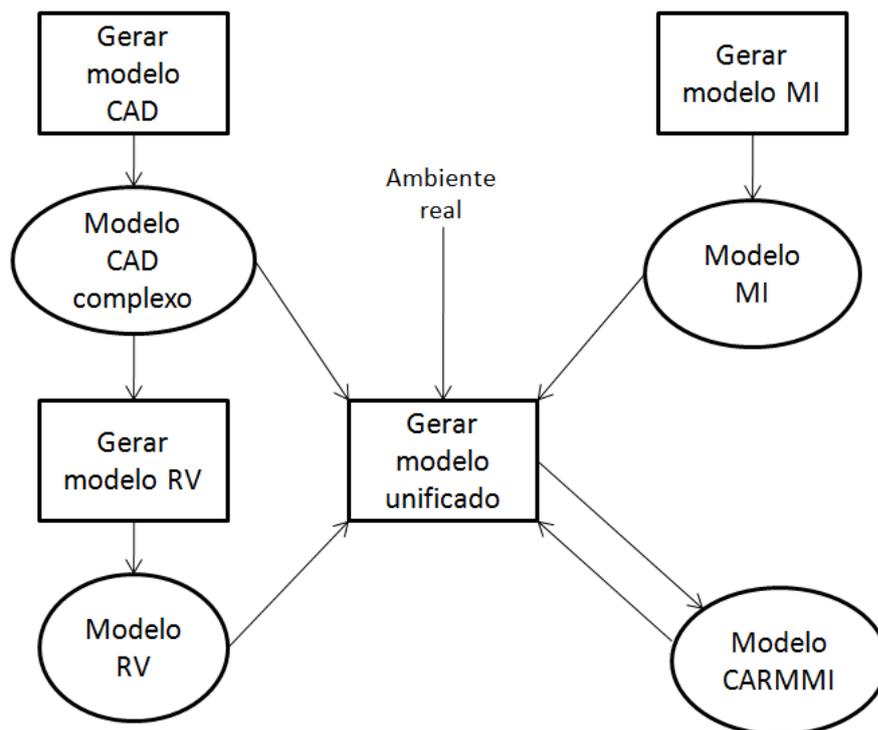


Figura 13 Etapa de modelagem.

A modelagem CAx é gerada por ferramentas CAD/CAE/CAM. A partir do modelo CAD é possível extrair diversas informações a respeito do equipamento. Nesta abordagem, primeiramente, é obtida a descrição hierárquica de componentes da máquina através do XML

gerado a partir da ferramenta CAx. De posse do modelo de projeto, geralmente arquivos de extensão *stp*, *dxf* ou *dwg*, gera-se, através do sistema CAx (exportação de formatos), um XML com a estrutura do equipamento/componente. Neste arquivo XML é possível obter atributos dos componentes tais como: medida, material e restrições. Estas informações podem ser apresentadas na interface mista conforme necessidade do operador.

A modelagem virtual é obtida após uma etapa de conversão CAD-RV. A partir do modelo geométrico em CAD é possível obter o modelo virtual da peça através da exportação de formatos na ferramenta CAx. Devido à complexidade dos modelos de máquinas, isto é, grande número de polígonos do modelo, uma etapa de redução de complexidade deve ser executada. Nesta etapa utiliza-se uma ferramenta que reduz o número de polígonos sem que haja perda de qualidade para o modelo virtual. Na verdade, apenas os polígonos que representam as superfícies dos componentes da máquina são importantes para representação do modelo de realidade virtual do equipamento. Sendo assim a maioria dos polígonos internos são desprezados para criação do modelo RV.

A conversão CAD-RV é um dos gargalos da área de computação gráfica. Mesmo as ferramentas de geração de protótipo virtual mais modernas tais como, ferramentas DMU – *Digital Mock Up*, não possuem recursos de conversão direta para modelos complexos. Quando os modelos apresentam um grande número de polígonos, o que é comum em máquinas da indústria é necessário uma etapa de redução de complexidade antes de gerar o modelo virtual. Para obtenção do modelo CAD simples passível de conversão RV, são necessárias diversas operações de redução, até que o número de polígonos gere o modelo virtual passível de ser renderizado na interface mista. Esta etapa de conversão CAD-RV é representada na Figura 14 e detalha o bloco “Gerar modelo RV” da Figura 13.

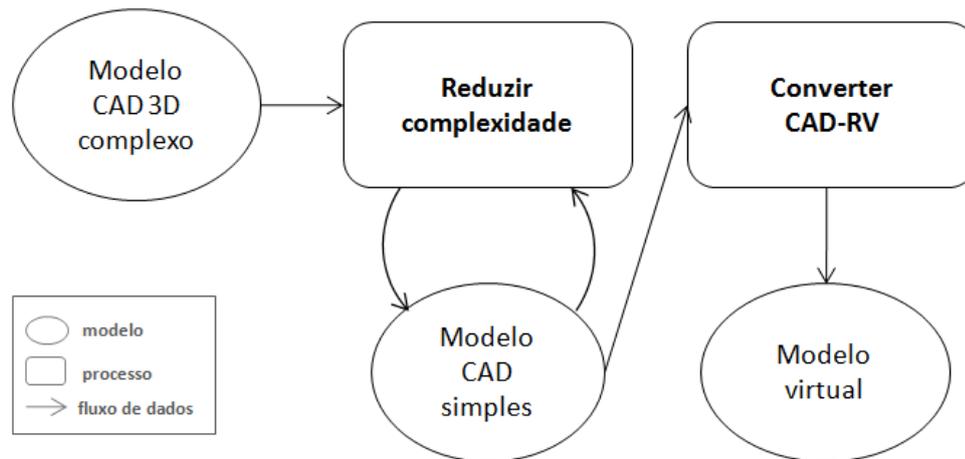


Figura 14 Detalhamento do bloco “Gerar modelo RV”.

A modelagem dos dados de manutenção é constituída por sinais gerados pelos módulos da arquitetura OSA-CBM, descrito na seção 2.2.1.1, que após processados geram arquivos de saída em formato texto e gráficos. Os sinais são adquiridos através de sensores para aquisição de dados. Cada sensor possui relação com um componente e sinal da máquina. A modelagem MI desta abordagem possui cinco tipos de saídas em formato texto e gráfico fornecido pelo sistema de manutenção inteligente e baseado nas normas e arquiteturas descritas na seção 2.2.1. Cada um dos conteúdos de saída é gerado pelas respectivas etapas do sistema MI: manipulação, avaliação, diagnóstico, prognóstico e tomada de decisão. Estas etapas serão descritas no próximo capítulo conforme Figura 16 do modelo conceitual.

O resultado desta etapa da metodologia são os dados originados das modelagens CAD, RV e MI. A próxima seção descreve a etapa de integração dos modelos de dados provida pelo CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*). Ou seja, apresenta “como” os dados de manutenção se relacionam com os modelos virtuais e CAD representando a intersecção entre os domínios da Figura 1.

4.2 ETAPA 2: INTEGRAÇÃO E GERENCIAMENTO

A etapa de integração e gerenciamento desta metodologia busca resolver um dos gargalos da maioria das pesquisas de realidade mista: “o gerenciamento da informação - quais dados trazer, quando apresentar e onde posicionar”. Neste contexto, os estágios *Relacionar* e *Descrever*, desta etapa, contemplam a integração de diferentes modelos e o estágio *Extrair*, é responsável pelo gerenciamento da informação.

O ponto chave desta etapa foi o uso da estrutura de máquina/equipamento (modelo CAD) para o relacionamento (integração) dos diferentes modelos de dados. A estrutura de componentes da máquina é dada pelo formato XML gerado por uma ferramenta CAx a partir do modelo CAD. Esta estrutura de componentes é apresentada na interface de configuração para que o operador relacione o componente com o sensor e o TAG⁶.

Uma vez obtido o arquivo XML com a estrutura de componentes da máquina e realizado a configuração da interface pelo usuário, o sistema gera então um arquivo de descrição (estágio *Descrever*) do relacionamento entre os dados CAD (descrição componente), MI (dados do sensor) e RV (conteúdo virtual) conforme parâmetros definidos na interface de configuração (ver Figura 25). Como resultado deste estágio é gerado, pelo sistema de visualização, um modelo relacional que funciona como um mapa de relação entre os dados CAD, RV e MI.

O mapa de relação entre os componentes é dado pela estrutura hierárquica de nodos do formato XML. A etapa de configuração da interface de visualização é essencial para a descrição do relacionamento entre os dados. O usuário (operador) relaciona o TAG com o componente e o sensor relacionado a este. Para cada TAG, relacionado a um componente, existe um caminho de dados de manutenção, dados RV e dados CAD. Tendo relacionado o TAG ao componente e ao sensor, é possível então a geração, pelo sistema, do arquivo XML

⁶ O termo TAG é utilizado neste trabalho para referenciar um dispositivo/componente/elemento utilizado para identificação e rastreamento de posição. O TAG pode ser um sensor, um RFID ou um marcador.

relacional. A Figura 15 representa a estrutura do XML relacional. O XML relaciona para cada TAG os dados CAD, MI e RV. O dado *atributos* são textos extraídos do modelo CAD e o dado *modelo*, oriundo do DATARV, representa o modelo virtual do componente/equipamento.

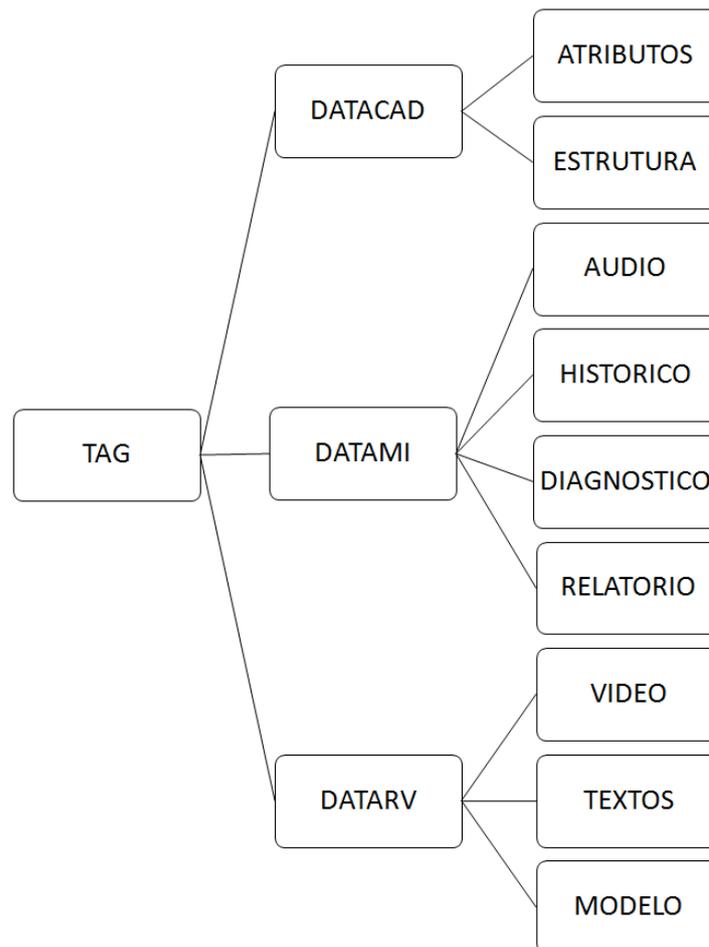


Figura 15 Estrutura do XML relacional.

Este arquivo XML define um *modelo relacional* que é utilizado como mapa de busca pelo sistema para o gerenciamento da informação que será apresentada na interface. Toda requisição do operador produz uma consulta neste mapa. A geração de conteúdo é determinada de acordo com os dados disponíveis nos caminhos descritos no modelo relacional. Novos dados podem ser integrados ao modelo e armazenados mediante requisição do operador. Esta fase caracteriza o estágio *Extrair* desta etapa da metodologia.

Nesta abordagem os arquivos multimídia disponíveis para os estudos de caso em questão não foram armazenados em banco de dados, e sim em localizações definidas na interface do sistema. Entretanto futuras implementações para o armazenamento e organização da informação em banco de dados são pretendidas.

4.3 ETAPA 3: VISUALIZAÇÃO

A etapa de visualização é responsável por misturar os elementos virtuais na cena real para auxílio à atividade de manutenção. Esta etapa é composta por três estágios: *Capturar*, *Rastrear* e *Sobrepor*. A visualização de elementos virtuais juntamente com o ambiente real é realizada através de um dispositivo de visualização. A utilização de óculos permite ao usuário ver através das lentes transparentes o equipamento de manutenção e permanecer com as mãos livres durante a operação. As requisições podem ser feitas mediante comando de voz ou dispositivo convencional (teclado e *mouse*). Conforme a interação do usuário as informações virtuais vão sendo sobrepostas a imagem real.

A utilização de dispositivos de *hardware* para interação tais como: *Head Mounted Display* (HMD) ou óculos tri-dimensionais, *data gloves* (luvas), *Cave Automatic Virtual Environment* (CAVEs) e dispositivos móveis (celulares e PDAs) aumentam a capacidade de interação do usuário com a interface de visualização. Estes dispositivos são comumente integrados aos sistemas de visualização mista para fornecer uma maior sensação de imersão e facilidade de comunicação e interação homem-máquina.

Os dispositivos de *hardware* para interação através de técnicas de realidade mista permitem que o usuário seja um componente da interface, funcionando como um sensor ativo de alimentação e configuração do sistema. A inclusão “*human-in-loop*” com o sistema de

manutenção inteligente é obtida graças à interface tangível e intuitiva fornecida pelos dispositivos de interação do ambiente misto.

Os dispositivos de entrada básicos para o desenvolvimento de ambiente misto são: câmera, microfones, teclados e mouses. A função da câmera é a captura do ambiente real. O teclado e mouse são dispositivos convencionais de interação frequentemente utilizados para envio de comandos aos sistemas de realidade mista. Os microfones são utilizados para enviar requisições através de comando de voz e, além disso, viabilizam operações no ambiente onde o operador necessita estar com as mãos livres. Os sensores são utilizados para aquisição de dados (de vibração, temperatura, torque e etc.) dos componentes da máquina monitorados pelo sistema CBM. A posição de colocação dos objetos virtuais é realizada mediante utilização de dispositivos de localização tais como: RFID, marcadores (etiquetas impressas detectadas por processamento de imagem) ou sensores.

Os dispositivos de saída utilizados para visualização do ambiente misto podem ser: TabletPC, dispositivos móveis como PDAs e telefones. Outra possibilidade são os HMDs, tipo óculos tri-dimensionais com lentes transparentes chamados *see-through*, que possibilitam a visualização da cena real com a sobreposição de objetos virtuais. Os *headphones* são utilizados para recebimento de instruções de áudio como recurso de interação com o ambiente misto.

A primeira etapa da visualização é a captura do ambiente real. Uma câmera (ou *webcam*) deve ser utilizada para fazer a aquisição de imagens do ambiente real. Após o ambiente ter sido capturado é necessário que o sistema processe as requisições do usuário e as intervenções do sistema de manutenção inteligente. A interface mista fornecerá dois tipos de visualização: a visualização guiada e a visualização autônoma.

A visualização guiada é apresentada de acordo com as solicitações do operador. A visualização autônoma pode ser solicitada pelo operador ou pelo sistema de manutenção

inteligente. Sempre que o sistema MI detectar a degradação de comportamento do equipamento, este deverá enviar um sinal para o sistema de visualização para que a interface apresente automaticamente o componente em degradação. Identificado degradação no funcionamento de algum componente o sistema MI dispara um evento de alarme para o sistema de visualização.

A segunda etapa é o rastreamento de posição, ou seja, a identificação do local de posicionamento dos elementos virtuais. Para o posicionamento do conteúdo virtual é necessário um rastreamento da cena. A colocação de marcadores como identificadores de posição (que funcionam como TAGs) foi realizada para este propósito. Técnicas sem utilização de marcadores utilizando a geometria dos elementos constituem uma nova área de pesquisas da realidade virtual, no entanto possuem alta complexidade e necessitam de grande poder computacional (COMPORT, 2003) (LIMA, 2009). Identificado a posição, o conteúdo virtual deve ser sobreposto. Este conteúdo pode ser desde um modelo virtual 3D, até anotações textuais ou gráficos.

A terceira e última etapa da visualização é a sobreposição. Neste estágio a etapa de gerenciamento da informação (*Extrair*) irá definir qual conteúdo será apresentado sobre o marcador na interface mista. Assim toda a sobreposição de elementos virtuais é controlada pela etapa de extração de conteúdo, onde de acordo com a requisição do operador o sistema busca no modelo relacional quais as informações disponíveis para a solicitação. Nesta etapa deverão ser retornados pelo sistema as coordenadas (x,y) da cena onde o elemento virtual deverá ser colocado. Estas coordenadas podem ser identificadas na cena mediante diversas técnicas, como por exemplo: através de técnicas de processamento de imagens (utilizando marcadores) ou transmitidas por sinais de frequência (utilizando RFID).

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia descrita neste capítulo permitiu a identificação dos processos envolvidos no escopo desta pesquisa. A definição de cada uma das etapas estabeleceu um método para implementação da abordagem e auxiliou na definição de um modelo conceitual que descreve o fluxo de dados e as funções de cada etapa descrita na metodologia.

Com base no modelo conceitual foi definido um modelo em diagrama de classes para integração e gerenciamento de dados de manutenção. Este modelo denominado CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*) foi descrito em linguagem UML e utilizado como estrutura de dados na implementação da abordagem. A metodologia descrita neste capítulo possibilitou o desenvolvimento do modelo conceitual e do modelo CARMMI. Estes modelos constituem o foco desta Tese e serão descritos no próximo capítulo.

5 A ABORDAGEM

Este capítulo descreve uma abordagem baseada em modelo para a utilização de realidade mista em atividades de manutenção. A abordagem propõe um modelo conceitual e um modelo em diagrama de classes. Estes modelos objetivam a criação de uma interface mista para visualização, integração e gerenciamento da informação em sistemas de manutenção inteligente. A seção 5.1 descreve o modelo conceitual e a seção 5.2, o modelo CARMMI.

5.1 O MODELO CONCEITUAL

O desenvolvimento da metodologia auxiliou na definição de um modelo conceitual para descrição da abordagem. O modelo descrito em diagrama de blocos fornece uma visão completa da proposta incluindo os domínios envolvidos para a solução do problema bem como suas respectivas funções. O modelo representa em termos funcionais a implementação da visualização mista aplicada a sistemas de manutenção inteligente.

O modelo conceitual mostrado na Figura 16 indica as funções através de retângulos e o fluxo de informações através das setas. É possível identificar no diagrama do modelo conceitual os três domínios e a intersecção entre estes propostos como solução para implementação da abordagem (conforme Figura 1).

Simultaneamente ao processo de captura e rastreamento, os dados dos sistemas CAx, virtual e de manutenção, são relacionados. O processo de relacionamento inicia após a configuração da interface, pelo usuário, mediante auxílio do sistema. Nesta etapa o usuário relaciona um TAG (marcador, sensor ou RFID) com o nome do componente ao qual deseja visualizar e seu respectivo sensor. Desta forma, o sistema mapeia automaticamente os caminhos para os modelos de manutenção, CAx e virtual, utilizando os caminhos pré-definidos pelo sistema.

Tendo sido configurada a interface, começa o processo de integração dos modelos que é dividida em duas fases: “relacionamento” e “descrição”. Para “relacionar” as informações são utilizados o arquivo XML de descrição da estrutura equipamento e os caminhos de dados gerados pelo sistema de acordo com a configuração do usuário. A “fase de descrição” gera um arquivo XML que relaciona os identificadores (TAGs) com os dados de manutenção (gráficos 2D/txt), virtuais e CAD. Este arquivo XML de relacionamento gera o modelo relacional que é utilizado para o gerenciamento da informação.

O processo de gerenciamento da informação contempla duas fases: “extração” e “geração de conteúdo”. A “fase de extração” da informação utiliza o arquivo XML de relacionamento como mapa de identificação da informação para geração de conteúdo virtual. Cabe salientar que a sobreposição de elementos virtuais é em tempo real, porém a geração de conteúdo não. Modelos de áudio, vídeo e textos podem ser previamente armazenados em locais específicos para posterior apresentação.

Os retângulos azuis descrevem as funções dos sistemas CAx. A fase de “descrição da estrutura” gera um XML hierárquico das partes do equipamento que é utilizado como “esqueleto” para relacionar as informações MI e RV. Modelos virtuais 3D (wrl ou x3d) e propriedades dos componentes são utilizadas na etapa de gerenciamento da informação, e geradas respectivamente pelas fases “conversão CAD-RV” e “descrição atributos”.

As funções do sistema de manutenção são representadas pelos retângulos rosas. Basicamente as funções “aquisição de dados”, “manipular de dados”, “avaliar”, “diagnosticar”, “prognosticar” e “apoiar tomada de decisão” são baseadas na norma ISO13374 descrito na seção 2.2.1.1. Esta norma é usada na implementação da maioria dos sistemas de manutenção preditiva. A idéia é interagir através da interface mista com todos os módulos destes sistemas e extrair documentos textos e gráficos 2D destas informações.

O ambiente misto é criado de acordo com as requisições do operador e/ou pela intervenção do sistema de manutenção. Em modo de visualização autônoma (automática), o sistema MI ativa um sinal de alarme em caso de predição de falha para apresentação do conteúdo na interface de segurança indicando os locais de falha.

Resumidamente, a seqüência do fluxo da informação representada na Figura 16 pode ser descrita através do exemplo de utilização do sistema de realidade mista proposto nesta Tese.

- Primeiramente o operador inicializa a ferramenta de visualização (sistema CARMMI);
- Sabe-se que o sistema de manutenção e CAx executam em modo *off-line* concomitantemente ao sistema de realidade mista, ou seja, produzem seus resultados previamente e não durante a visualização;
- Inicializada a ferramenta, a interface de configuração deve ser configurada pelo operador;
- Configurado a interface e enviado o comando de requisição pelo operador, a ferramenta inicia a captura do ambiente real;

- De acordo com a requisição do operador, a função de extração de dados é iniciada, utilizando o modelo XML relacional como mapa de busca e identificação da informação a ser apresentada;
- Neste XML relacional o caminho para os dados gerados pelo sistema CAx (modelo virtual e atributos) e pelo sistema de manutenção (gráficos e textos gerados a partir das etapas do sistema MI) são descritos;
- Por fim, com base na requisição do operador, o conteúdo é gerado de acordo com o modelo relacional e enviado para o sistema CARMMI. Este irá sobrepor o conteúdo no local rastreado pela colocação de marcadores.

Este sistema de RM também denominado CARMMI, é implementado e validado no próximo capítulo.

5.2 O MODELO CARMMI

O modelo CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*) é a implementação do modelo conceitual descrito na seção 5.1. Este modelo utiliza dados CAx (de sistemas CAD/CAE/CAM) para integração de técnicas de realidade mista em sistemas de manutenção inteligente.

A linguagem escolhida para descrição do modelo foi UML a (*Unified Modeling Language*). Esta linguagem possibilita através do paradigma da orientação a objeto uma modelagem visual do comportamento do sistema, independente de linguagens de programação e processos particulares.

A Figura 17 representa as classes do modelo CARMMI em cinza, e as classes do modelo PDKM em branco. Nesta figura apenas as classes do modelo PDKM que possuem

relação direta com o modelo CARMMI são apresentadas. O modelo PDKM foi escolhido como modelo de descrição de processos de manutenção, por apresentar informações detalhadas a respeito de todas as etapas do ciclo de vida do produto conforme seção 2.2.1.2.

A classe central do modelo CARMMI é a **MIXED_SCENE**. Esta classe descreve os atributos e operações do objeto *cena_mista*. Para a renderização da cena mista a classe **MIXER_MS** herda os métodos e atributos da classe **MIXED_SCENE**. A classe misturador (**MIXER_MS**) é responsável por capturar (*capture()*), rastrear (*tracking()*) e sobrepor (*superimpose()*) o conteúdo gerado, pela classe **MANAGER_INTEGRATOR**, na cena de visualização.

O gerenciamento da ordem de sobreposição do conteúdo e o relacionamento dos diferentes tipos de dados são funções da classe **MANAGER_INTEGRATOR**. Esta classe baseia-se nas requisições do usuário, na aplicação e na configuração do sistema definida pelo operador. A **MANAGER_INTEGRATOR** é composta por três classes agregadas **DESCRIPTOR_MI**, **MONITOR_MI** e **TAG_CONF**, e possui relação de composição forte com a **CONTENT_MAN** e **MIXER_MS**. A classe **MANAGER_INTEGRATOR** relaciona (*relate()*) e descreve (*describe()*) o arquivo XML de relacionamento, baseado na configuração do usuário e no mapeamento de TAGs (relação entre marcadores e componentes da máquina) fornecida pela classe **TAG_CONF**.

A classe **DESCRIPTOR_MI** descreve dois arquivos: um arquivo texto com os atributos do CAD e uma arquivo *dat* com a estrutura do modelo CAD (*descr_attributes()*, *descr_structure()*). O outro método da classe é gerar o modelo virtual do equipamento (*convert_CADRV()*).

A classe **CONTENT_MAN** gerencia a ordem de apresentação do conteúdo (*gen_objnum()*) gerado pela classe pai (**MANAGER_INTEGRATOR**) a partir da execução do método *generate_content()*. A **MANAGER_INTEGRATOR** gera o conteúdo após executar os

métodos das classes `DESCRIPTOR_MI` e `MONITOR_MI`. A classe `CONTENT_MAN` lista os diferentes conteúdos para cada TAG e gera a seqüência e o número do objeto a ser misturado. Dados textuais, modelos 2D e 3D, áudios e vídeos podem compor o conteúdo de cada TAG.

As classes **USER**, **APPLICATION** e **CONFIGURATION** descrevem os objetos que inicializam o sistema de visualização mista. O usuário (operador de manutenção) interage diretamente com a cena mista através de configurações e requisições. A classe **APPLICATION** descreve e identifica as aplicações disponíveis: diagnóstico, planejamento e segurança. A classe **SENSOR** descreve os sensores e seus respectivos arquivos de aquisição de dados. Esta classe possui relação de agregação com a classe **MONITOR_MI**.

A classe **CONFIGURATION** é composta por duas classes: **VIS_CONF** e **SEC_CONF**. A **VIS_CONF** descreve as configurações do tipo de visualização. E a **SEC_CONF** descreve as configurações de segurança. A classe **CONFIGURATION** relaciona para cada TAG: um componente de um equipamento; o sensor ao qual se deseja visualizar informações; e os caminhos dos dados CAD, de manutenção (MI) e virtual (MR).

A classe **TAG_CONF** possui os atributos de identificação (**Tag_ID**); tipo (*Type*); e esta associada aos dados identificados pelos atributos (**MI_ID**, **CAD_ID** e **RV_ID**) gerados respectivamente pelas classes **MONITOR_MI**, **DESCRIPTOR_MI** e **VIRTUAL_DESC**. Esta classe possui também o método de mapeamento de TAGs (*map_tag()*), ou seja a identificação dos dados MI, CAD e RV para cada TAG.

A classe **MONITOR_MI** é a que irá descrever os dados de manutenção. Por esta razão, possui associação direta com quatro classes do modelo PDKM (**FIELD_DATA**, **RESOURCE**, **EVENT** e **PHYSICAL_PRODUCT**). Da classe **FIELD_DATA** é gerado um arquivo texto com histórico de manutenção que pode ser visualizado em componente *listbox* na interface mista. As informações da classe **RESOURCE** são usadas para planejamento de manutenção. Da classe **EVENT** são extraídos o estado da atividade de manutenção. E a classe **PHYSICAL_PRODUCT** do modelo PDKM descreve o componente físico e possui informações de todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Os métodos da classe `MONITOR_MI` buscam gráficos, das etapas de manipulação de dados, avaliação, diagnóstico, prognóstico e tomada de decisão, gerados pelo sistema MI. O método `view_hist_FD()` gera o histórico de manutenção baseado nos atributos da classe `FIELD_DATA`. Para isto, foram adicionados dois atributos à classe `FIELD_DATA` considerados importantes para a avaliação da informação e geração de conhecimento: o atributo `WHY` (descrição da causa do defeito) e `WHICH` (recursos – peças e ferramentas - necessários para a manutenção do componente do equipamento). O método `monit_event()` é o que seta o atributo `Alarm_ID` quando o sistema de manutenção detecta estado de degradação em algum componente.

A classe `VIRTUAL_DESC` descreve os objetos virtuais gerados pela execução do método `convert_CADRV()` da classe `DESCRIPTOR_MI`. Os atributos são a identificação do componente virtual (`RV_ID`), o nome do componente virtual (`RV_name`), o nome do arquivo que contém o modelo virtual (`modelRV_name`), e o nome do arquivo de vídeo do modelo virtual (`video_name`).

As classes `DESCRIPTOR_MI`, `MONITOR_MI` e `MIXER_MS` descrevem três objetos abstratos de dados. Estes objetos: descritor, monitor e misturador, representam respectivamente: o comportamento de funções de descrição estrutural e virtual do modelo CAD; os dados de manutenção relacionados aos componentes do CAD; a visualização da cena mista.

O modelo UML em diagrama de classes permite a utilização de linguagens de programação para banco de dados relacionais tais como SQL (*Structured Query Language*) ou linguagens com suporte a orientação a objeto tais como C++ e Java.

Resumidamente as classes representadas na cor cinza descrevem os métodos e atributos dos objetos necessários para a implementação do uso de realidade mista em sistemas de manutenção inteligente conforme o modelo conceitual proposto. A Figura 17 representa o

modelo CARMMI e as classes diretamente envolvidas do modelo PDKM e utilizadas na validação. O modelo PDKM fornece as informações a respeito do equipamento e do histórico de atividades de manutenção.

A Figura 18 mostra a integração do modelo CARMMI com todas as classes do modelo PDKM. Embora não tenha sido implementado o modelo PDKM completo, futuras implementações, dentro do projeto internacional PROSSALIC (*Product-Service System across LifeCycle* – FP7-PEOPLE-2010-IRSES), pretendem testar a utilização de banco de dados relacionais com o modelo CARMMI.

O modelo PDKM descrito na Figura 18 foi implementado em MySQL por Cassina (2008) e esta sendo estudado e discutido a possibilidade de comunicação e extração dessas informações através da integração do modelo CARMMI.

As classes do modelo CARMMI, descrito na Figura 17, foram utilizadas para definição da estrutura de dados na implementação do sistema CARMMI de visualização. A linguagem utilizada para a programação do sistema foi a C++ sobre a plataforma Visual Studio.

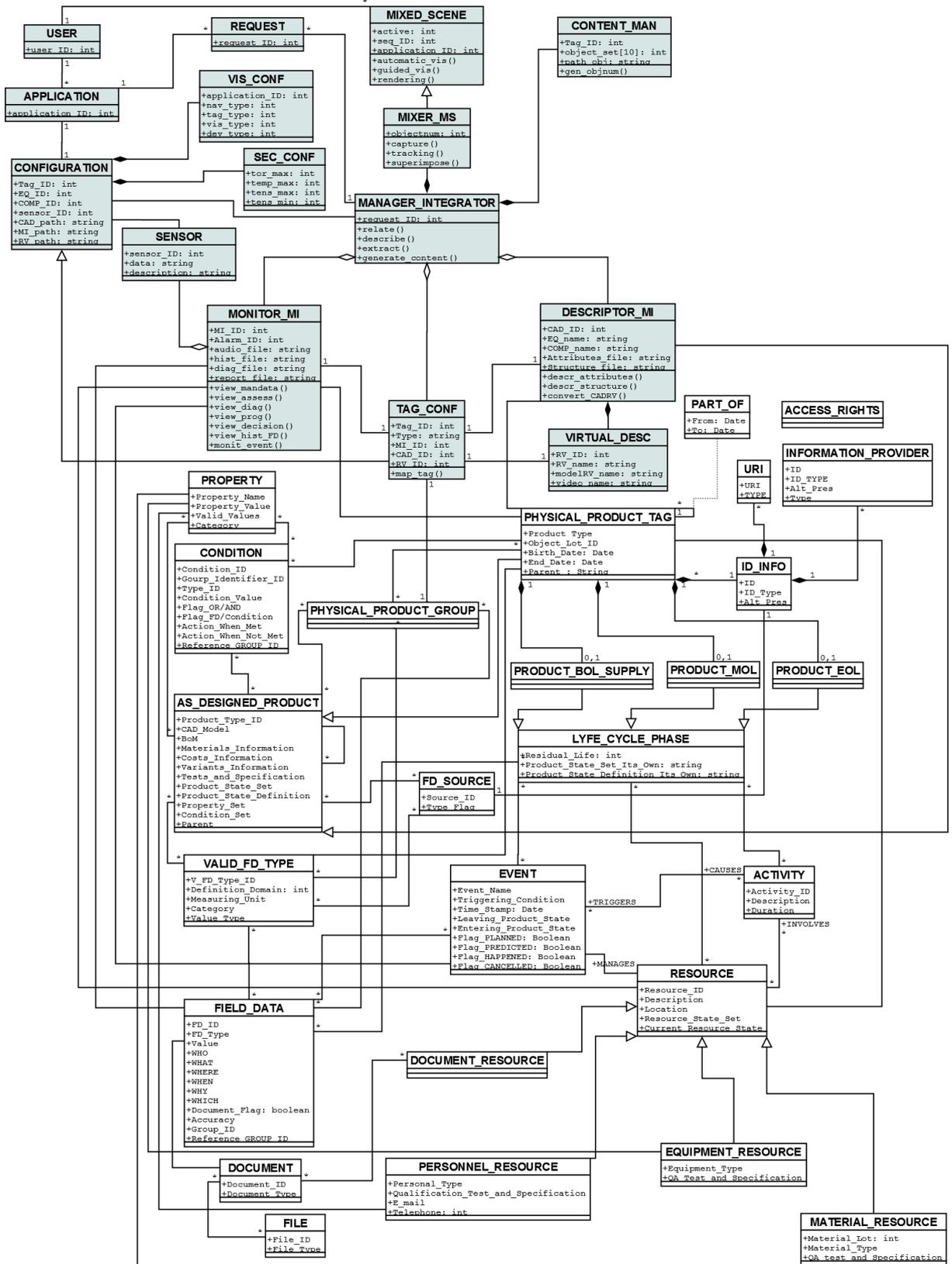


Figura 18 O modelo CARMMI integrado ao PDKM completo.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da abordagem descrita neste capítulo, um modelo para integração de dados heterogêneos (formatos e origens distintas) foi proposto. A abordagem visa possibilitar o gerenciamento, a comunicação e a geração do conteúdo virtual de maneira dinâmica para interface de visualização mista.

Esta integração descrita pelo modelo CARMMI permitirá que a visualização mista seja modificada de acordo com a interação do operador e com o estado das informações oriundas dos sistemas. Desta forma, incluirá o operador no *loop* do sistema MI, onde toda alteração em um determinado tipo de dado refletirá visualmente nas demais informações relacionadas a este.

Para que isto ocorra, o modelo relaciona para cada componente da máquina, as diferentes informações a respeito deste componente, através de TAGs. Cada TAG possui relacionado a si: elementos virtuais (RV); dados estruturais (CAD); dados de manutenção (MI).

O modelo CARMMI possibilita que através de uma descrição estrutural fornecida pelo modelo CAD, sejam relacionadas às informações advindas do sistema de manutenção inteligente, e de realidade mista.

6 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritas as tecnologias e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, com base na abordagem descrita no Capítulo 5. A primeira seção descreve as ferramentas utilizadas para implantação da proposta. A segunda seção descreve as etapas de implementação: modelagem (implementação do modelo CARMMI, desenvolvimento do modelo CAD e do modelo RV); programação da interface (implementação do sistema); e monitoramento (implementação da interação com o sistema de manutenção inteligente).

6.1 TECNOLOGIAS

Embora o foco da implementação tenha sido a programação de um modelo para utilização de RM na visualização de operações de manutenção, identificou-se a necessidade de utilizar uma ferramenta de manutenção inteligente e o modelo CAD do equipamento para potencializar os recursos fornecidos pelo sistema de visualização. Desta forma, a Tabela 5 representa os módulos de implementação de *software* no âmbito de três funcionalidades distintas: programação da interface, modelagem e monitoramento.

Tabela 5 Tecnologias de implementação.

| Funcionalidade | Tecnologia |
|--|---------------------|
| Integração e gerenciamento da informação | Visual Studio – C++ |
| Renderização | GLUT / OPENGL |
| Captura, rastreamento e sobreposição | ARTOOLKIT |
| Modelagem virtual | VRML / 3DXML |
| Modelo relacional | XML |
| Modelagem/conversão CAD-RV | SOLIDWORK |
| Redução de complexidade | VIZUP |
| Diagrama classes - CARMMI | UML |
| Sistema de manutenção inteligente | Watchdog |
| Implementação dos métodos CBM | MATLAB |

As questões de modelagem estão representadas na Tabela 5: modelagem do CARMMI em UML; redução de complexidade (VIZUP) e conversão CAD-RV (SOLIDWORKS); criação do modelo virtual em VRML e 3DXML. A primeira etapa para o desenvolvimento da abordagem foi descrever o modelo conceitual proposto. Para isto, a linguagem UML foi escolhida para a representação do uso de RM em sistemas de manutenção inteligente.

Os modelos da estrutura do equipamento foram desenvolvidos por ferramentas CAx cuja extensão dos arquivos CAD utilizados foram *stp* e *dxf*. De posse do modelo CAD do equipamento foi necessário realizar a etapa de redução de complexidade antes de gerar o modelo virtual. Para este propósito utilizou-se a ferramenta VIZUP onde o número de polígonos foi reduzido sem perder qualidade em termos de visualização do modelo virtual. Após a etapa de redução de complexidade foi realizada a conversão do modelo CAD para o modelo RV. A conversão de formatos do modelo CAD para arquivos *3dxml* e *wrl*, foi executada pela ferramenta SOLIDWORKS.

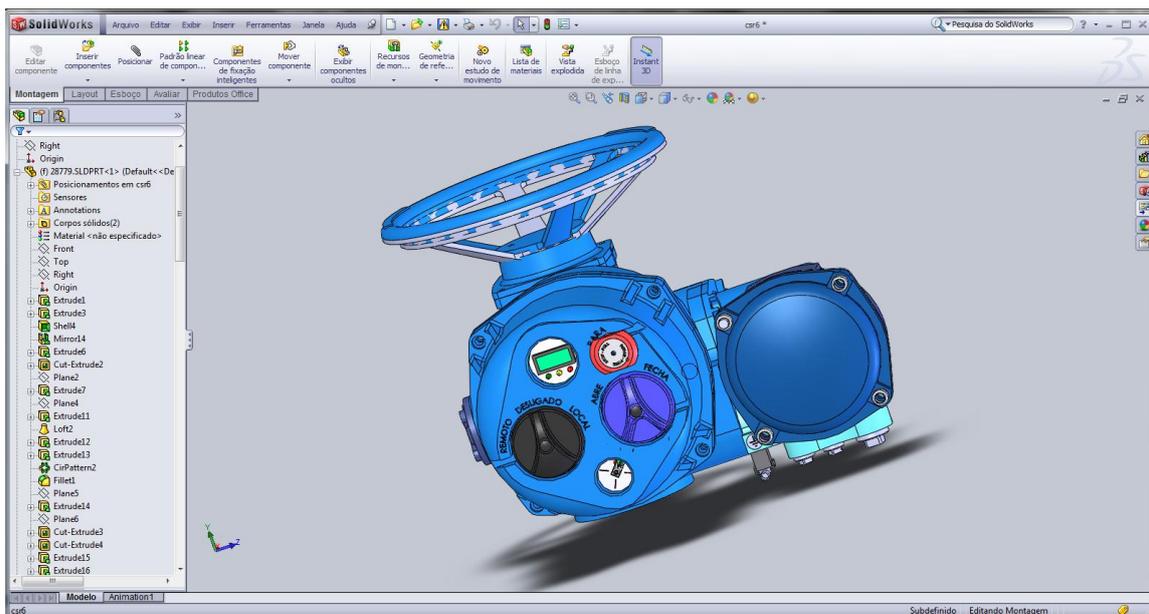


Figura 19 A ferramenta *SOLIDWORKS*.

A linguagem VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) foi escolhida para criação do modelo virtual juntamente com a 3DXML. Estes formatos possibilitam a descrição textual e hierárquica dos componentes do modelo. A etapa de redução de complexidade é necessária, pois a maioria dos modelos complexos (isto é, com grande número de polígonos) não permite a conversão direta CAD-RV.

A programação da interface foi realizada utilizando a linguagem C++ sobre a plataforma Visual Studio. Toda a implementação referente à sobreposição de elementos virtuais sobre a cena real em tempo de execução, foi realizada utilizando as bibliotecas OpenGL, GLUT e ARToolkit. A biblioteca gráfica OpenGL e a GLUT proveram rotinas para a renderização da cena e a biblioteca ARToolkit foi utilizada para captura, rastreamento e posicionamento dos elementos virtuais. A ARToolkit utiliza funções de processamento de imagens para detecção de marcadores na cena capturada conforme Figura 20. Estes marcadores são etiquetas impressas em papel e colocadas sobre os componentes reais aos quais se deseja visualizar informações.

A biblioteca ARToolkit possui suporte as linguagens Java e C++, e alta velocidade de processamento devido a sua boa integração com processadores multimídia MMX. Sendo assim, a escolha pela utilização da ARToolkit deu-se devido a sua possibilidade de captura, rastreamento e sobreposição em um tempo de resposta que atende aos requisitos de operações de manutenção industrial, conforme experimentos realizados em laboratório.

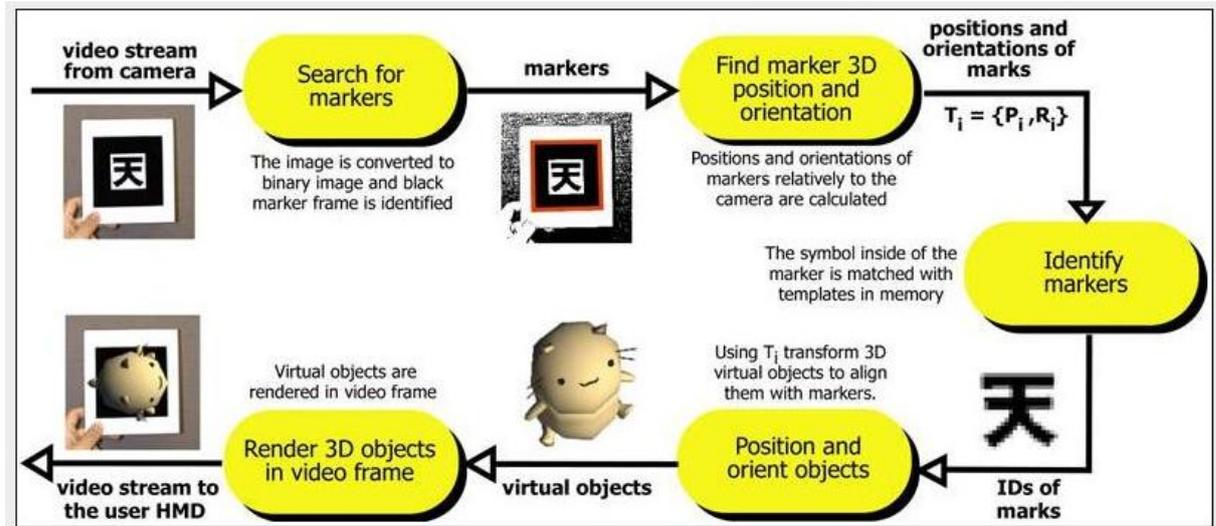


Figura 20 A ferramenta ARToolkit (KATO, 2000).

É importante destacar que o uso da biblioteca ARToolkit implica no uso de marcadores que irão funcionar como TAGs de localização. Entretanto, novos dispositivos para localização de componentes e sobreposição de objetos virtuais, tais como: RFIDs e sensores, estão sendo investigados. Pesquisas em realidade mista sem o uso de marcadores também são possíveis, no entanto estes trabalhos esbarram no aumento da complexidade de implementação e aumento do custo computacional.

O gerenciamento da sobreposição dos conteúdos virtuais deu-se através da utilização do modelo CARMMI descrito em UML através das classes em cinza demonstradas na Figura 17. O modelo CARMMI definiu a estrutura de dados para o desenvolvimento da interface de visualização. Em relação às classes do modelo PDKM, apenas as que possuem relação direta com o modelo CARMMI foram implementadas, são estas: PHYSICAL_PRODUCT, FIELD_DATA, RESOURCE, EVENT e AS_DESIGN_PRODUCT.

O outro módulo de implementação é o de monitoramento. Para validação desta etapa, utilizou-se o sistema de manutenção inteligente *Watchdog Agent* (ver Figura 21-esq), dentro do escopo de um projeto de cooperação entre UFRGS e IMS Center. Este sistema possui uma

plataforma de *hardware* composta pelo elemento núcleo denominado *Watchdog Agent* que possibilita o monitoramento de condição de funcionamento do equipamento (DJURDJANOVIC, 2003). Além disso, o *Watchdog* fornece um conjunto de ferramentas (*toolbox* do MATLAB - código aberto) para o processamento de sinais, extração de características, cálculo de desempenho, predição de desempenho e diagnóstico de saúde dos equipamentos, que constituem o sistema da plataforma.

A *toolbox* do MATLAB é mostrada na Figura 21 a direita. Durante os estudos de caso realizados com operadores da indústria, constatou-se que a interface do *Watchdog* possui utilidade acadêmica para especialistas na área de processamento de sinais. Entretanto em termos de visualização, interação e geração de conhecimento para o operador de manutenção, a interface do sistema MI é pouco aplicável.

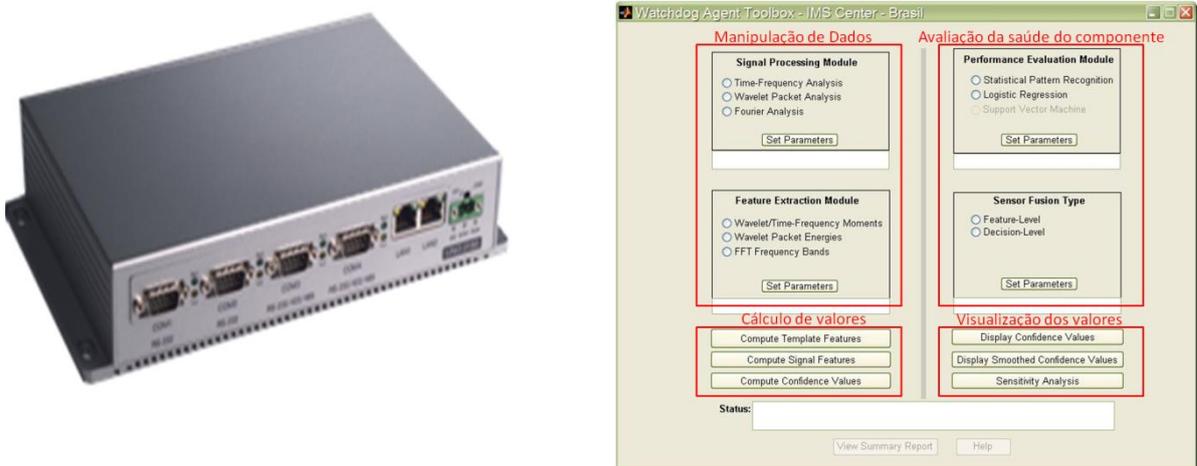


Figura 21 A ferramenta Watchdog (esq) e *toolbox* do Matlab (dir).

A captura do ambiente real foi feita por uma *webcam* Genius Look316 com suporte a uma taxa de 30 *frames* por segundo. O computador utilizado foi um Vaio Core i3, 4GB de memória, placa gráfica NVidia GeForce GT330M GPU com 512MB de cache e *clock* 2.13GHz e um ACER *Aspire One*, processador Atom 1.60GHz, 1GB de memória. No próximo capítulo resultados referentes a desempenho de *hardwares* são comparados.

As próximas seções detalham as implementações em termos da modelagem, monitoramento e da programação da interface, conforme tecnologias descritas na Tabela 5.

6.2 DA MODELAGEM

Esta primeira etapa de implementação constituiu-se em dois momentos: modelagem orientada a objeto do modelo CARMMI e modelagem virtual dos elementos a serem utilizados na visualização. A partir do modelo conceitual, foi descrito em UML o modelo CARMMI (Figura 17). Simultaneamente a transcrição do modelo CARMMI para a linguagem C++, questões de modelagem CAD-RV foram sendo desenvolvidas.

A escolha da linguagem UML para descrição do modelo deve-se a possibilidade do uso de diagramas fornecerem um modelo semântico para a modelagem do comportamento do sistema. Além disso, a descrição em diagrama de classes implementa características de reusabilidade e portabilidade. Com isto, é possível estender e adaptar o modelo conforme necessidades dos operadores de manutenção.

A Figura 22 representa o modelo CARMMI simplificado destacando o relacionamento entre as principais classes. O modelo foi implementado a partir de quatro classes principais. As classes MIXER_MS e MIXED_SCENE são responsáveis pela etapa de visualização. A classe DESCRIPTOR_MI usa o arquivo XML gerado a partir do CAD e extrai as informações da estrutura da máquina e as características dos componentes. Esta classe representa a etapa de modelagem. A classe MONITOR_MI busca os arquivos de saída gerados pelas cinco etapas do sistema de manutenção inteligente. A classe MANAGER_INTEGRATOR juntamente com a TAG_CONF é responsável pelo relacionamento e gerenciamento do conteúdo apresentado na interface e representa a etapa de integração e gerenciamento da metodologia.

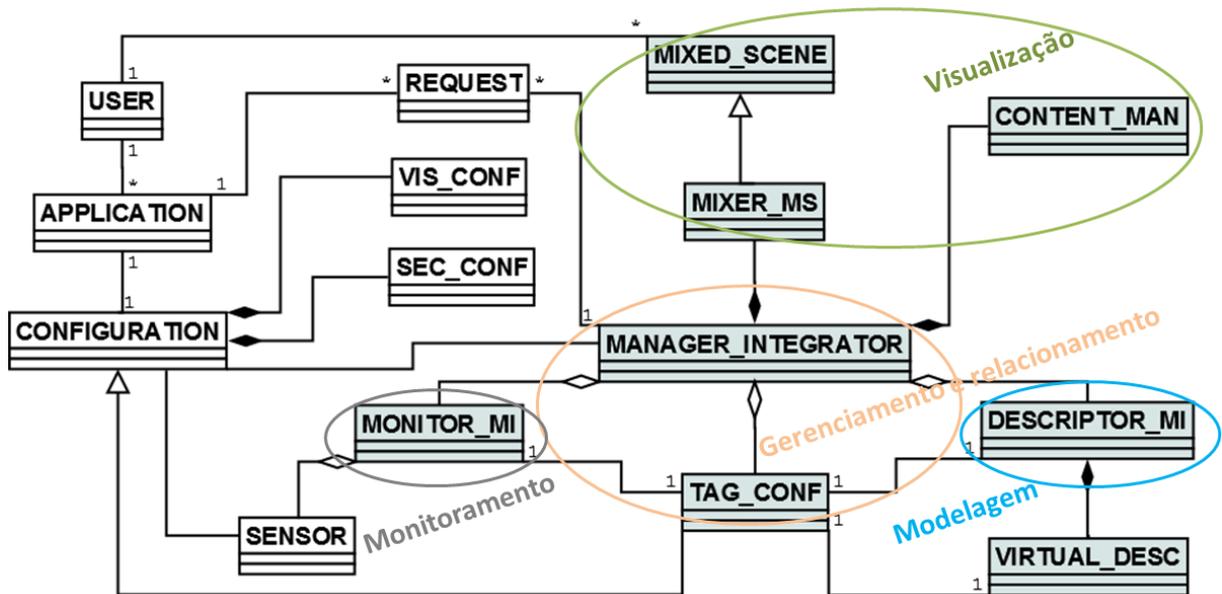


Figura 22 Modelo simplificado das relações e funções do modelo CARMMI.

A apresentação da cena mista é gerenciada pela `MANAGER_INTEGRATOR` de acordo com as configurações e requisições do operador. Esta classe centraliza toda a implementação da abordagem. A `MANAGER_INTEGRATOR` é composta por três classes agregadas `MONITOR_MI`, `DESCRIPTOR_MI` e `TAG_CONF`, que definem os conteúdos relacionados à manutenção inteligente (MI), dados CAD e relação dos conteúdos com as TAGs. A classe `TAG_CONF` mapeia para cada TAG os dados CAD, RV e MI. De posse dessas informações a `MANAGER_INTEGRATOR` gera o conteúdo a ser misturado pela classe `MIXER_MS`.

A classe `MIXER_MS` possui relação de composição com a `MANAGER_INTEGRATOR` que gera o conteúdo a ser misturado. A classe pai `MIXED_SCENE` é a responsável por apresentar e renderizar as cenas de visualização (autônoma ou guiada) através da classe `MIXER_MS` que herda seus métodos e atributos.

Baseado na configuração do sistema, foi gerado, pela rotina *relate()* da classe *MANAGER_INTEGRATOR*, o arquivo de configuração em formato ASCII (*dat*) com a relação entre os modelos *vrml* e *tags* (código A1 - arquivo *vrml_data.dat*). Também foram gerados os arquivos com os parâmetros de posicionamento dos modelos *vrml* (código A2 - arquivo *patt-d.dat*). Esta rotina utiliza o arquivo XML da estrutura CAD do equipamento, gerado pela classe *DESCRIPTOR_MI*, para descrever (*describe()*) o modelo relacional em XML (código A3). A etapa de extração *extract()* utiliza o arquivo XML como o mapa de relacionamento entre os diferentes modelos. De posse deste modelo relacional o conteúdo é gerado e pode ser misturado ao ambiente real.

A classe misturador (*MIXER_MS*), descreve os métodos *capture()*, *tracking()* e *superimpose()* utilizando as funções descritas abaixo. Os passos para implementação desses métodos e seus respectivos nomes são os seguintes:

- i. Inicializar a aplicação (*init*)
- ii. Capturar um quadro de vídeo (*arVideoGetImage*)
- iii. Detectar os marcadores (*arDetectMarker*)
- iv. Calcular a transformação da câmera (*arGetTransMat*)
- v. Desenhar os objetos virtuais (*draw*)
- vi. Fechar o dispositivo de vídeo (*cleanup*)

Para cada um desses passos a biblioteca *ARToolkit* oferece funções que são listadas ao lado dos itens acima. Entretanto para utilização destas funções era necessário que o operador configurasse a aplicação mediante edição de códigos e arquivos. Nesta implementação, a abordagem utiliza a interface do sistema para realizar estas configurações, e

ao invés do usuário, a classe `MANAGER_INTEGRATOR` relaciona as informações e gerencia a apresentação de conteúdo.

No código A4 são testadas a renderização de modelos VRML. O número de marcadores encontrados está contido na variável `marker_num`. O parâmetro `marker_info` é um ponteiro para uma lista de estruturas de marcadores contendo a informação de coordenadas, valores de confiança do reconhecimento e os identificadores dos objetos correspondentes a cada um dos marcadores conforme código A5.

Por fim, cabe ressaltar que a rotina `convert_CADRV()` não é implementada pelo sistema, apenas descrita no modelo UML. A impossibilidade de conversão direta CAD-RV, fez com que esta etapa fosse executada manualmente. No entanto acredita-se que a nova geração de *softwares* CAD possibilite futuramente a conversão direta de modelos complexos.

A linguagem XML na descrição do arquivo relacional permite a comunicação entre diferentes sistemas e fornece uma descrição em estrutura aninhada, em formato de árvores, com nodos pais e filhos caracterizados pelas marcações da linguagem.

Na interface do sistema serão configurados opções e diretórios de localização de dados para integração entre marcadores, sinais, componentes CAD e componente do modelo virtual. Desta forma, o sistema através da interface especificará quais elementos devem aparecer (*objectnum*); e em que ordem (*seq_ID*) estes elementos devem aparecer, auxiliando assim a tomada de decisão durante a atividade de manutenção.

A próxima seção descreve a implementação do módulo de monitoramento.

6.3 DO MONITORAMENTO

Este módulo de implementação equivale à programação referente ao sistema de manutenção inteligente. Como o propósito não é implementar o sistema MI, e sim visualizar seus dados durante a atividade de manutenção, fez-se necessário o uso de uma ferramenta MI. A ferramenta escolhida foi a plataforma acadêmica IMS com o sistema *Watchdog Agent*.

Basicamente alterou-se os códigos em MATLAB da *toolbox* fornecida pelo *Watchdog*, para enviar os dados de saída para a localização padrão utilizada pelo sistema de visualização. Para utilização de outros sistemas de manutenção inteligente é necessário ter conhecimento da localização dos dados de saída e configurar a ferramenta de visualização de acordo com esta localização.

A versão disponível do *software* do *Watchdog* implementa três camadas do padrão CBM: os dois primeiros módulos (processamento de sinal e extração de características) correspondem à camada de manipulação de dados, enquanto os dois últimos módulos (avaliação da *performance* e fusão dos sensores) correspondem à camada de avaliação da saúde do sistema. A interface gráfica do *Watchdog* representa a camada de “*Human-Computer Interface*” da arquitetura OSA-CBM apresentada na Figura 4.

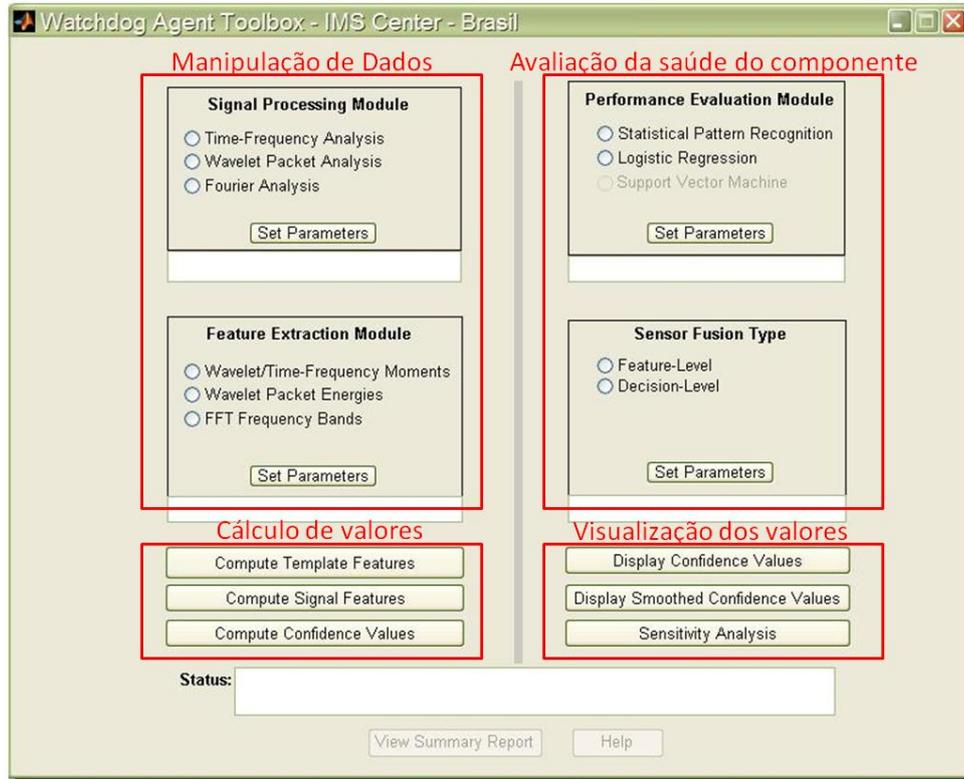


Figura 23 Tela principal da versão de desenvolvimento do *WatchdogAgent Toolbox*.

A Figura 23 mostra a tela principal da versão do *software*, fornecido pela *toolbox* do *Watchdog*, indicando as camadas implementadas.

Durante os experimentos no estudo de caso 4 os usuários da área de manutenção foram solicitando mudanças na interface do sistema MI. A primeira solicitação foi a remoção das caixas de escolha de métodos de cada etapa. A idéia era visualizar apenas o estado dos atuadores sem precisar configurar os métodos. Outra modificação foi à inclusão da função para gerar um relatório com a lista de estados de cada atuador, esta lista foi gerada em formato de planilha eletrônica. A Figura 24 apresenta a tela principal do *Watchdog* alterada para atender as requisições dos operadores.

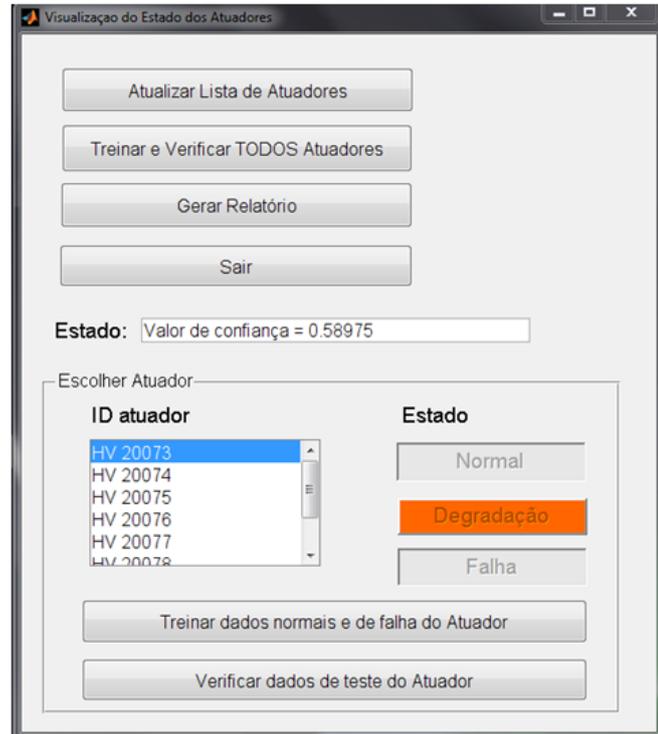


Figura 24 Modificação da tela principal do *WatchdogAgent Toolbox*.

A partir desta interface o sistema MI gera as saídas gráficas do valor de confiança do componente, e salva estes gráficos 2D em formato *jpg* no diretório `</DATAMI/DIAG_DEG>` da localização padrão utilizada pelo sistema de visualização. E no diretório `</DATAMI/REPORT_DEC/>`, o sistema salva o relatório dos componentes monitorados.

O próximo passo foi criar o sistema de visualização mista de forma a validar o modelo desenvolvido. As interfaces da ferramenta devem apresentar as informações do sistema de manutenção inteligente de maneira a auxiliar na atividade de manutenção.

6.4 DA INTERFACE

O sistema CARMMI desenvolvido para validação do modelo possui três tipos de aplicações possíveis: diagnóstico, segurança e planejamento. Estas aplicações foram escolhidas por apresentarem consideráveis vantagens mediante utilização de realidade mista. Para cada aplicação há dois modos de visualização - mista e virtual, que podem apresentar dois tipos de navegação: automática ou guiada. Nesta Tese focou-se nas interfaces do sistema que apresentam visualização mista para as aplicações de diagnóstico e segurança.

Neste sistema, a interface de visualização mista apresenta em uma janela o ambiente real capturado pela câmera e elementos virtuais sobrepostos na cena real através de marcadores. A visualização virtual mostra somente elementos virtuais na janela de visualização. O modo de navegação automática apresenta o conteúdo virtual na interface sem a intervenção do usuário. O modo guiado é gerenciado por comandos vindos do operador.

O sistema foi desenvolvido levando em consideração o fato de os operadores não serem programadores nem especialistas na área da computação. Além disso, considerou-se que o ambiente deva permitir que diversos tipos de usuários possam acessar suas opções de visualização. Dessa forma, as interfaces buscam possuir caráter intuitivo e proporcionar um aprendizado pela prática (*learning by doing*) com o mínimo de intervenções.

Entrevistas, reuniões e experimentos em chão de fábrica mostraram que quanto mais reduzido e simples são os menus de interação, maior a aceitabilidade, menor o tempo de treinamento para uso da ferramenta e mais eficiente se torna o uso do sistema de visualização. A implantação de novos métodos de operação de manutenção depende primeiramente do convencimento do gerente de manutenção. Em seguida, é necessário um treinamento do operador para o uso da ferramenta. Foram nos testes de usabilidade da ferramenta que os operadores requereram o mínimo de esforço de interação, ou seja, número reduzido de menus, janelas e comandos de interação. A idéia é clicar uma vez e obter a informação. Logo, o

projeto de cada interface foi construído de acordo com as requisições dos usuários nos estudos de caso 3 e 4, conforme descritos no próximo capítulo.

A interface inicial do sistema CARMMI apresenta três menus: o menu Aplicação, o menu Configuração e o menu Ajuda. O menu Ajuda apresenta o manual do sistema de visualização. O menu configuração pode ser alterado conforme a necessidade do usuário, no entanto alguns de seus valores vêm definidos como padrão para diminuir o número de interações. Adicionalmente, os modos de navegação e visualização também podem ser escolhidos nesta interface.

Na janela de Configuração, o tipo de navegação, o TAG, e o tipo de dispositivo pode ser configurado. Os valores definidos como padrão para as aplicações são respectivamente: navegação guiada, TAG tipo marcador, visualização mista e dispositivo *desktop*. Para cada marcador o operador deve relacionar a parte do equipamento o qual deseja visualizar a informação e o sensor que monitora as condições do componente. Os caminhos (ou localizações) para cada tipo de dado vêm previamente configurados na interface. A Figura 25 mostra a interface de configuração.

Os parâmetros para as aplicações de diagnóstico, segurança e planejamento podem ser atualizados através da interface de configuração. O mapeamento de TAGs, (*map_tag()*) gerado pela classe TAG_CONF e descrito no arquivo XML de relacionamento é gerado a partir dessas configurações.

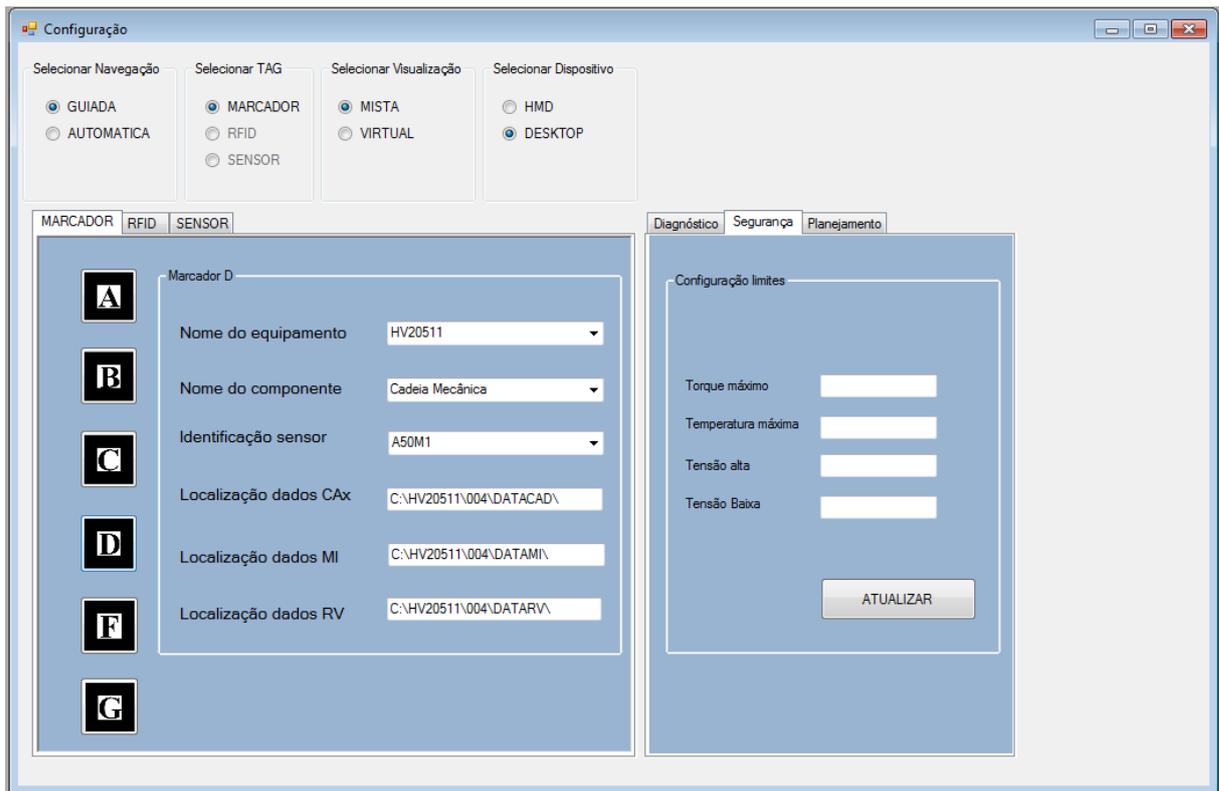


Figura 25 Interface de configuração.

Clicando no menu <aplicação> da Figura 26, o usuário pode abrir uma aplicação salva anteriormente ou criar um novo tipo de aplicação: diagnóstico, segurança ou planejamento.

A interface da aplicação *diagnóstico* possui dois botões ou comandos principais: <Visualizar condição> e <Selecionar equipamento>. Ao selecionar qualquer um dos comandos, o sistema de realidade mista inicia o processamento. As operações de captura (*capture()*) do ambiente real e rastreamento de TAGs (*tracking()*) iniciam imediatamente após os comandos serem ativados. Tendo os TAGs sido identificados na cena, o sistema busca no arquivo XML as descrições de relacionamento entre TAGs e componentes para gerar os conteúdos.

A Figura 26 mostra a interface de diagnóstico em modo visualização mista e navegação guiada usando dispositivo tipo *desktop*. Nesta interface quando o operador clica no botão <Visualizar condição> com a *checkbox* de degradação marcada, somente os atuadores em

estado de degradação são identificados na cena por elementos virtuais representados por setas vermelhas indicando o nome do componente. A *listbox* com a lista de atuadores apresentadas na interface é implementada através do componente *treeview* da ferramenta Visual Studio.

Para clicar no botão <Selecionar equipamento> o usuário deve primeiro escolher o equipamento (neste caso o atuador) desejado na *listbox treeview* (caixa da lista de elementos). É possível também obter instruções de áudio e de vídeo quando disponíveis e salva na localização padrão. A interface indica a disponibilidade de mídias através da ativação dos botões de vídeo e áudio, ou seja, quando a TAG contiver algum desses arquivos relacionado ao componente.

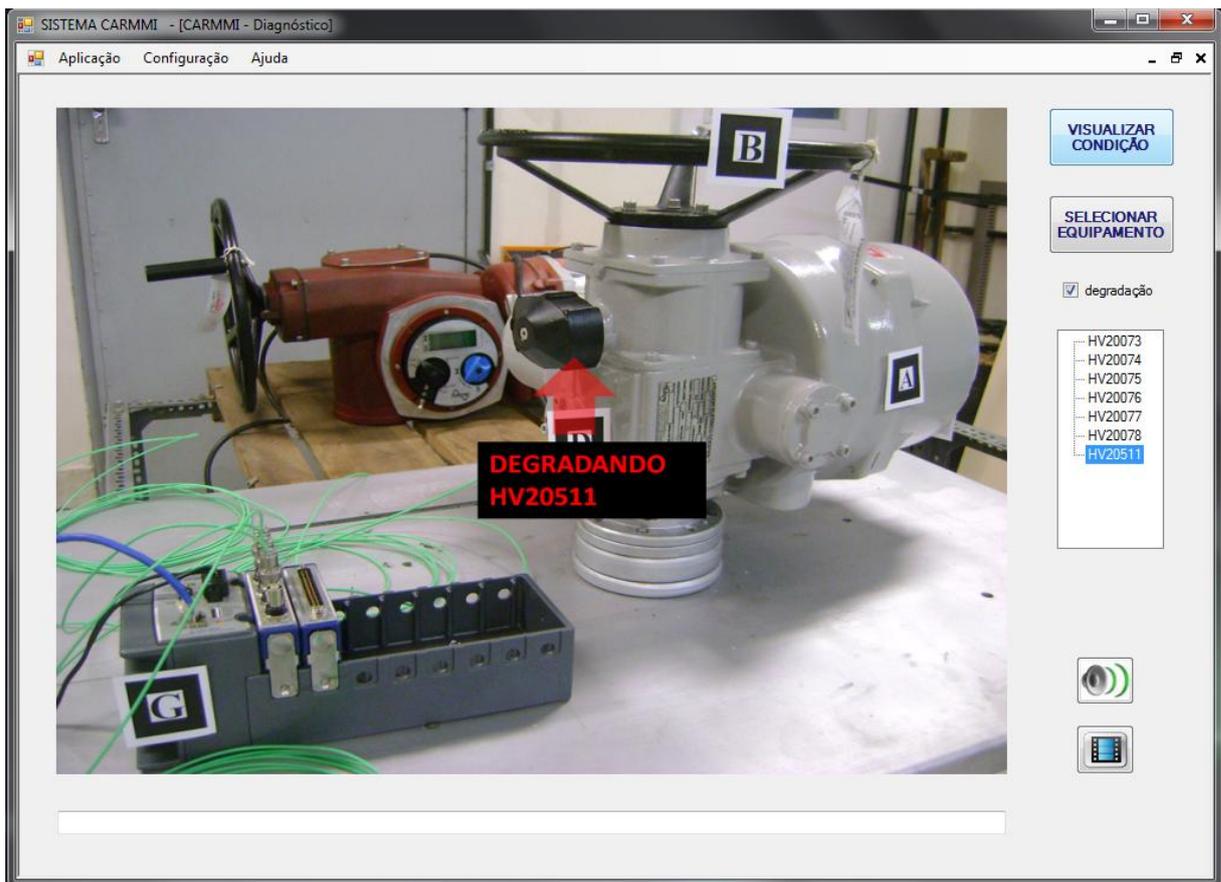


Figura 26 Interface de diagnóstico (visualização da condição) em modo de visualização mista com navegação guiada usando dispositivo desktop.

A aplicação diagnóstico permite que o operador identifique na planta (cena real), de acordo com o estado de funcionamento do equipamento, os dispositivos que requerem urgente manutenção. Com este tipo de visualização é possível iniciar o planejamento prévio da atividade de manutenção seguindo as disponibilidades da planta sem causar prejuízos decorrentes de paradas indesejadas.

O modo de execução dos sistemas CAx e do sistema de manutenção inteligente é *offline*, ou seja, as saídas dos sistemas não são geradas em tempo de execução (durante a visualização mista). Existe um pré-processamento destes sistemas onde os dados de manutenção e os modelos CAD usados pela ferramenta são armazenados previamente e mapeados no modelo XML de relacionamento. Por outro lado, o sistema de realidade mista é *online*, isto significa, que os dados virtuais são sobrepostos em tempo de execução, de acordo com os comandos e a navegação escolhida pelo usuário.

Após identificar na cena os equipamentos em condição de degradação, é possível solicitar informações referentes a cada máquina individualmente pelo clique do botão <Selecionar equipamento>. Ao clicar neste botão o usuário deve ter previamente selecionado na *listbox* o equipamento (neste caso o atuador) ao qual deseja visualizar informações. Em seguida o operador deve posicionar-se em frente ao equipamento desejado. Uma vez, tendo escolhido o equipamento as seguintes informações podem ser oferecidas: guia de manutenção, histórico de manutenção e manual do equipamento.

A Figura 27 apresenta uma interface em modo de navegação automático usando dispositivo HMD (*Head Mounted Display*). Para iniciar, parar e pausar o modo de visualização são utilizados os ícones <play>, <stop> e <pause> respectivamente. As teclas <Pg Up> e <Pg Dn> devem ser acionadas para navegação nos ícones. Com as teclas <Home> e <End> o usuário pode escolher entre os três tipos de conteúdo fornecido pela interface: guia

de manutenção, manual do equipamento e histórico de manutenção do equipamento. Futuras implementações em comando de voz são pretendidas para navegação na interface.

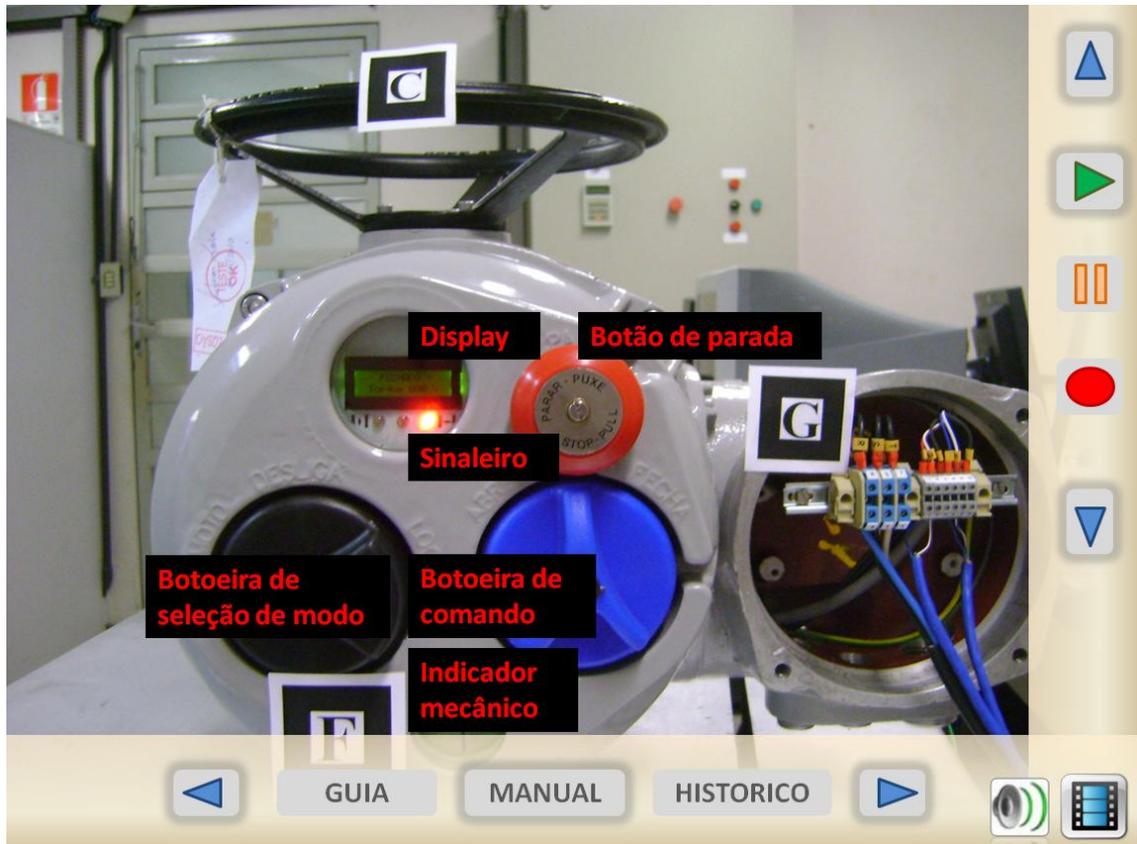


Figura 27 Interface de diagnóstico (manual do equipamento) em modo de visualização mista com navegação automática usando dispositivo HMD.

Também podem ser observados na figura o uso de TAGs do tipo marcadores do ARToolkit para sobreposição de textos virtuais sobre a cena real durante a visualização do manual do equipamento.

A ordem de apresentação do conteúdo na interface mista é gerenciada pelo modelo CARMMI do sistema, mais especificamente pela classe MIXED_SCENE e seu atributo *seq_ID*. Esta ordem pode ser aleatória ou ordenada. Quando a navegação é guiada a ordem depende do comando e é aleatória, ou seja, o conteúdo é apresentado conforme requisição do usuário. Quando a navegação é automática a ordem de apresentação do conteúdo é dada pela

ordem definida na configuração da aplicação. Isto implica que o sistema deve ser projetado e configurado mediante auxílio de especialistas de manutenção que devem definir a ordem de apresentação do conteúdo em caso de visualização automática.

O guia de manutenção são instruções textuais apresentadas em ordem de operação para o usuário. Estas instruções são apresentadas em formato texto e devem estar armazenadas previamente na localização padrão para os dados de manutenção. Modelos CAD virtuais da estrutura interna dos componentes e modelos de montagem e desmontagem são apresentados juntamente com o guia, quando estiverem disponíveis. Além disso, para melhor compreensão das instruções, sempre que houver recursos de áudio e vídeo para auxílio da visualização, ícones de áudio e vídeo são ativados na interface e poderão ser visualizados.

A outra interface de visualização para o equipamento é o histórico de manutenção. Esta interface faz parte dos conteúdos de diagnóstico e deve ser utilizada para visualização de um único equipamento. Nesta interface os dados da classe FIELD_DATA, a respeito do histórico de manutenção são apresentados e o operador pode atualizar os valores durante a operação. Três tipos de visualizações estão disponíveis: a visualização mista, que apresenta sobre os marcadores dados textuais e gráficos 2D relacionados aos TAGs; o modelo virtual do componente escolhido na *listbox* <estrutura do equipamento>; e dados de monitoramento a respeito do componente selecionado.

A inserção ou atualização dos dados do histórico de manutenção, pelo operador, pode ser realizada através da interface em modo de navegação guiada usando dispositivo *desktop* conforme Figura 28. As seguintes informações de histórico de manutenção são apresentadas na interface: COMPONENT (nome do componente), WHO (identificação do operador), WHAT (tipo de defeito), WHERE (localização do defeito), WHEN (data da operação de manutenção), WHY (causa do defeito) e WHICH (peças necessárias para operação).

Através do modelo PDKM a classe FIELD_DATA fornece os campos do histórico de manutenção apresentado na interface. Para validação experimental, dados foram extraídos do banco de dados implementado por CASSINA (2008) a partir do modelo PDKM. Outras informações foram inseridas através da interface com base nos estudos de caso realizados em laboratório. Estes dados, resultantes de experimentos, foram armazenados de forma a constituir o histórico de manutenção das máquinas analisadas.

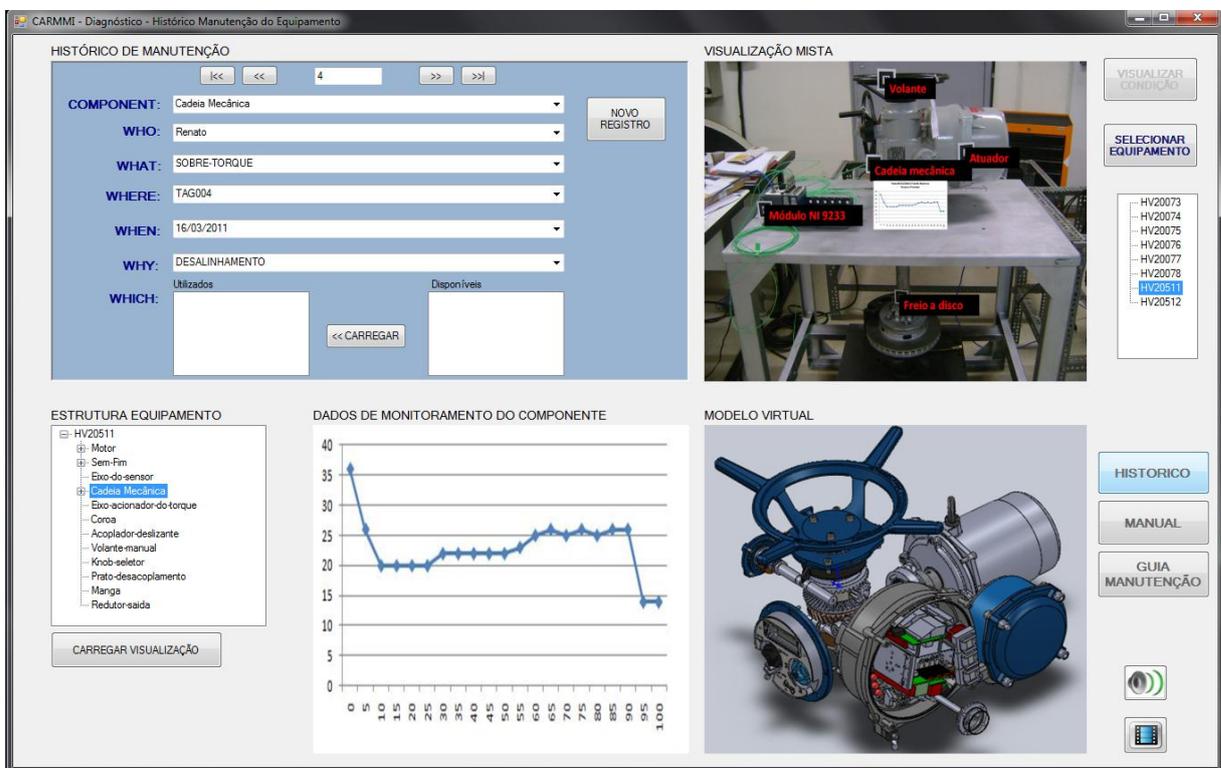


Figura 28 Interface de diagnóstico em modo de visualização mista com navegação guiada usando dispositivo desktop.

A outra aplicação proposta pela abordagem foi a aplicação de segurança. A interface para esta aplicação é semelhante à de diagnóstico para visualização da condição dos equipamentos da Figura 26. O que difere é que o operador visualizará apenas a localização dos equipamentos cujos valores ultrapassem os limiares definidos na interface de

configuração (Figura 25). Com o monitoramento destes valores é possível identificar visualmente as áreas de perigo em chão de fábrica. Os parâmetros a serem monitorados pelo sistema são: o torque, a temperatura e a tensão. Os limiares podem ser calibrados pelo usuário de acordo com o ambiente avaliado. Como na interface de diagnóstico, a visualização mista para aplicação de segurança destaca através de setas indicativas os dispositivos que ultrapassam os limiares de torque, temperatura e tensão. Desta forma, indica os locais de perigo na planta, para o usuário. Cabe salientar que a localização é obtida através da utilização de TAGs.

Uma característica importante do sistema CARMMI é quanto à disponibilidade da informação. É necessário que os dados de histórico de manutenção de componentes sejam periodicamente armazenados no sistema para que se tenha uma visualização consistente a respeito do equipamento. Além disso, é necessário que os sistemas de manutenção e CAx gerem as saídas descritas pelo modelo conceitual a fim de viabilizar uma visualização completa em termos da abordagem proposta.

A qualidade da visualização não está relacionada à quantidade de informação mas sim a diversidade e organização dos conteúdos virtuais apresentados. Possuindo a aplicação os dados do sistema CAx e do sistema MI, descritos anteriormente, um maior número de recursos tornam-se disponíveis para as visualizações. O que implica em uma maior possibilidade de geração de conhecimento e acesso a informação. Ou seja, a efetividade da visualização depende diretamente da alimentação dos dados nos sistemas CAx, MI e RV realizada por especialistas, engenheiros e operadores da área de manutenção.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As três etapas de implementação foram realizadas simultaneamente. Para a integração dos sistemas foi necessário padronizar os locais de entrada e saída de dados do sistema MI. Para isto, foi necessário modificar os códigos da *toolbox* do *Watchdog Agent*. Dessa maneira, a interface mista de visualização permite ao operador interagir com as saídas e entradas do sistema de manutenção.

A geração do código XML relacional além de fornecer um mapa textual de relacionamento entre os diferentes tipos de dados, possibilitará futuramente o compartilhamento da informação entre diferentes sistemas. A linguagem de marcação XML é uma alternativa para o uso de banco de dados relacionais na expansão da abordagem.

Resumidamente a etapa de programação da interface possibilitou validar experimentalmente o modelo CARMMI como estrutura de dados para a abordagem. No que se refere à implementação da modelagem CAD-RV, toda esta etapa foi realizada manualmente, apesar de descrita pela classe `DESCRIPTOR_MI`. Trabalhos futuros com uso de ferramentas DMU/CAX pode ser uma solução para automatização da fase de modelagem CAD-RV.

7 RESULTADOS

Os resultados vão desde a disseminação de trabalhos publicados até a participação e elaboração de projetos de pesquisa constituídos a partir da participação em eventos nacionais e internacionais na área de manutenção e manufatura. Durante o andamento das pesquisas, quatro estudos de caso foram analisados com as empresas: Gerdau, Coester-Petrobrás, *Balance Systems*, e ensaios laboratoriais na planta *Foudation Fieldbus*. Mesmo com alguns estudos de caso não concluídos integralmente resultados preliminares foram obtidos em cada um destes. Os resultados são discutidos no âmbito do modelo e do sistema. No âmbito do sistema questões de interface foram analisadas. No âmbito do modelo questões de modelagem CAD, RV e MI foram consideradas. Por fim a Tabela 8 com a descrição dos trabalhos disseminados durante o decorrer desta Tese é apresentada.

7.1 ESTUDO DE CASO 1 - ESTUDOS PRELIMINARES SOBRE MOTOR DA GERDAU AÇOS FINOS

Este foi o primeiro estudo de caso desta Tese. Parte da etapa de projeto da abordagem foi descrito com base nas informações obtidas na indústria Gerdau Aços Especiais, localizada em Charqueadas/RS. Em uma visita técnica, operações de manutenção realizadas em um motor crítico para a produção de aços finos foram avaliadas. Além disso, requisições a respeito de um sistema de auxílio à operação de manutenção foram discutidas.

O problema caracterizava-se pela parada indesejada de um motor. Mensalmente eram realizadas duas paradas de quatro horas cada uma, para realização de uma manutenção preventiva. Cada minuto de parada corresponde a um prejuízo na produção de quinhentos

reais (R\$ 500,00 - equivalente ao valor de 500 CDs para gravação). Em uma hora de parada, tem-se um valor de trinta mil reais (R\$30.000,00), em um ano este valor representa um montante de dois milhões e oitocentos e oitenta mil (R\$2.880.000,00). Se a utilização de técnicas de manutenção preditiva aliada ao uso de realidade mista no auxílio a operação de manutenção permitissem uma redução de uma hora na atividade de manutenção, tem-se uma economia de setecentos e vinte mil ao ano (R\$720.000,00). Valor considerável na redução de custos de manutenção.

Durante a visita técnica documentos textos, planilhas a respeito da atividade de manutenção, e fotos da seqüência de atividades no motor foram obtidas conforme figuras 29, 30 e 31.



Figura 29 À esquerda, máquina montada antes do início da manutenção. Ao centro, retirada da carenagem. À direita, impregnação com verniz isolante.



Figura 30 À esquerda, retirada da bucha. Ao centro, controle micrometrado das buchas. À direita, condição de óleo após a retirada das buchas.



Figura 31 À esquerda, selagem das caixas dos mancais. Ao centro, fechamento das carenagens. À direita, montagem das carenagens.

Com esta seqüência de tarefas um guia interativo de operação no motor começou a ser desenvolvido. Os dados a respeito do estado de funcionamento do motor eram obtidos através de um sistema denominado "EDAS". Este sistema é responsável pelo monitoramento *on-line* da corrente elétrica e a velocidade de todos os equipamentos pré-selecionados. Este *software* armazena os dados históricos dos últimos seis meses. Entretanto, não há análise de correlação entre as falhas de ocorrência e os parâmetros de monitoramento. Existem também outros sensores *off-line*, que controlam os parâmetros de fluxo de água e temperatura. Porém estes dados não são armazenados.

Projetos estão sendo elaborados para a implantação na indústria de um sistema de manutenção inteligente e utilização de técnicas de realidade mista na visualização, para auxílio na atividade de manutenção e redução no tempo de parada do motor.

De posse do histórico de manutenção foram analisados e armazenados os dados para o desenvolvimento de um guia de manutenção. A etapa seguinte foi a modelagem virtual do motor. A Figura 32 apresenta o modelo virtual obtido após a etapa de conversão CAD-RV.

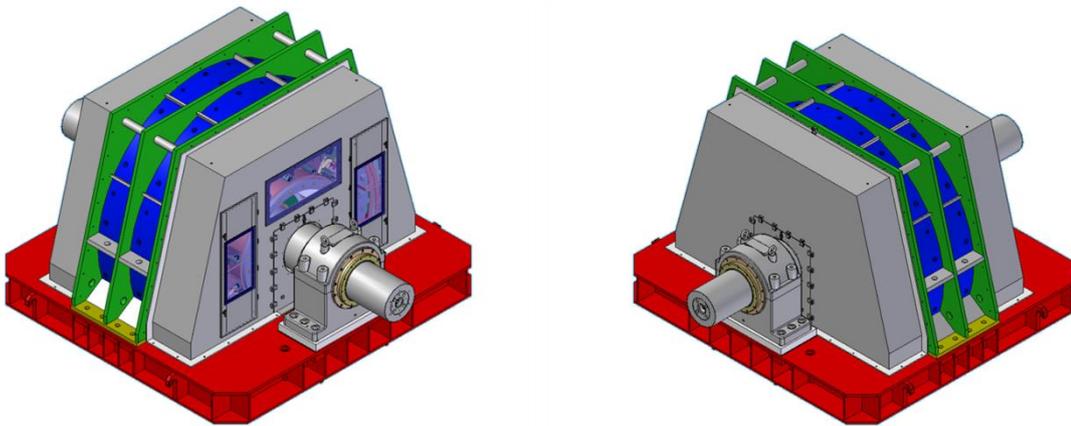


Figura 32 Modelos virtuais do motor.

A próxima etapa testou a sobreposição de modelos virtuais sobre uma cena real. Assim, os primeiros testes com a biblioteca ARToolkit foram realizados. A sobreposição de modelos virtuais animados e estáticos são apresentados na Figura 33. Modelos estáticos (sem movimento – a,b) e o modelo dinâmico (*wrl* animado - c) foram testados.



Figura 33 Modelos virtuais estáticos (a) (b) e dinâmico (c).

Observou-se durante os testes em laboratório parâmetros de iluminação (interferência de sombras), movimento da câmera/marcador e distâncias entre marcadores e a câmera. Fez-se uma variação destes parâmetros para verificar se estes influenciavam os resultados de visualização através da taxa de *frames* por segundo ou através da renderização dos modelos, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 Tabela de comparação da taxa de quadros por segundo.

| | Distância | Iluminação | quadros/seg |
|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Modelo Estático (a) | 70cm | normal | 14.0295 |
| Modelo Estático (a) | 1.46m | normal | 14.0122 |
| Modelo Estático (b) | 70cm | com sombra | 14.1211 |
| Modelo Estático (b) | 70cm | normal | 13.8217 |
| Modelo Dinâmico (c) | 60cm | normal | 14.9268 |
| Modelo Dinâmico (c) | 60cm | com sombra | 14.0231 |

Constatou-se que os modelos eram renderizados a uma distância máxima em torno de 1.50m. À distância e a iluminação não alteravam significativamente a taxa de *frames* por segundo, porém interferiam na detecção do marcador pela biblioteca impedindo a sobreposição dos modelos virtuais.

Analisando o experimento para aplicações em chão de fábrica onde o operador deseja visualizar informações a respeito de um componente e posiciona-se a uma distância próxima do equipamento, a solução mostra-se viável em termos de tempo de processamento e precisão na colocação de objetos. No entanto para equipamentos do tipo caldeiras esse tipo de TAG não é indicado.

Outra constatação é que vários modelos complexos de máquinas (com grande número de polígonos) não foram possíveis de serem renderizados. A necessidade de redução de complexidade de modelos virtuais foi identificada neste estudo de caso.

Em suma, com o estudo de caso do motor da Gerdau foram alcançados os seguintes resultados no âmbito da modelagem:

- Análise de requisitos para o desenvolvimento do sistema;
- Modelagem CAD-RV (modelos complexos – sem redução de complexidade) – identificado a necessidade de redução de complexidade para renderização do modelo;

- Testes com a biblioteca ARToolkit para sobreposição de elementos virtuais na cena real;
- Início do desenvolvimento de um guia interativo de instruções de manutenção do motor.

Durante o andamento das pesquisas, neste estudo de caso, resultados parciais para a abordagem descrita anteriormente foram alcançados. Porém os experimentos realizados não contemplaram - a integração das informações de manutenção e virtuais, e o uso da interface mista de visualização. Além disso, foi identificado problemas na conversão CAD-RV relacionados a sobreposição de modelos complexos (motor) na cena real.

7.2 ESTUDO DE CASO 2 – ENSAIO LABORATORIAL NA PLANTA FOUNDATION FIELD BUS

Neste estudo de caso experimentos em uma planta industrial foram realizados em laboratório. Aqui a integração entre o sistema de manutenção inteligente e o sistema de realidade mista foi implementada. Foram utilizados marcadores do ARToolkit como TAG para o posicionamento da informação virtual e localização do dispositivo.

A planta *Foundation Fieldbus Pilot* consiste em três tanques interconectados, quatro bombas AC e cinco válvulas para controlar o nível do líquido no sistema. É possível configurar diferentes malhas de controle na planta. O nível do tanque e a vazão do líquido são algumas das variáveis que podem ser controladas. Todos os sensores e atuadores da planta estão em rede e comunicam-se utilizando o protocolo FF (*Foundation Fieldbus*).

O sistema de manutenção inteligente *Watchdog* analisou dados de vazão do tanque e informações hipotéticas a respeito da válvula foram apresentadas sobre os marcadores. A Figura 34 apresenta o experimento.



Figura 34 À esquerda, *hardware* utilizado. Ao centro, montagem do experimento. À direita, utilização de HMD para visualização.

A descrição dos componentes da planta foi realizada manualmente. Logo, apenas alguns componentes foram listados. Esta descrição manual de componentes gera uma dificuldade para modelos complexos com grande número de elementos. Identifica-se então, neste estudo de caso, a necessidade de um modelo descritivo e hierárquico de componentes para navegação. Daí a necessidade de integrar-se sistemas CAx a solução. Neste experimento, apenas a intersecção entre os domínios de RV e MI foram contempladas.

Resumidamente, neste estudo de caso foram alcançados os seguintes resultados no âmbito da modelagem:

- Modelagem MI (saídas do sistema *Watchdog* foram utilizados na sobreposição de conteúdo) – caminhos para armazenamento dos dados MI foram alterados na *toolbox* do Matlab;

- Integração entre dados de manutenção e textos (objetos virtuais) através de TAGs – cada marcador estava relacionado a um caminho de dados de manutenção e a um caminho de dados virtuais;
- Testes com a biblioteca ARToolkit para sobreposição de textos na cena real;
- Teste com dispositivo de saída HMD (*Head Mounted display*) baseado em vídeo.

7.3 ESTUDO DE CASO 3 – ESTUDOS PRELIMINARES EM MÁQUINA DA BALANCE SYSTEMS

Após os desafios encontrados nos estudos de caso anteriores, buscou-se desenvolver uma solução que integrasse dados de manutenção e dados virtuais através da descrição do modelo CAD e utilização de marcadores. Esta intersecção entre os domínios RV, CAD e MI foi implementada através do modelo CARMMI. Este modelo gerencia e relaciona dados nas interfaces propostas para diagnóstico, segurança e planejamento da atividade de manutenção.

Este estudo de caso foi desenvolvido dentro de um programa de cooperação internacional entre as universidades POLIMI (Politecnico di Milano) e UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e a empresa *Balance Systems*. A *Balance Systems* projeta e desenvolve máquinas para indústria conforme especificação do cliente. A máquina produzida pela *Balance Systems* possibilitou validar resultados no âmbito da modelagem e do sistema de visualização mista. Em relação à modelagem foram obtidos:

- A estrutura XML do modelo *stp* da máquina – para descrição da estrutura de componentes do equipamento;
- A modelagem CAD-RV para obtenção do modelo simples da máquina (com redução de polígonos);

- O modelo virtual da máquina e de seus componentes em formato VRML (arquivos de extensão *wrl*).

Em relação à visualização foram obtidos:

- O guia de manutenção e o manual do equipamento;
- O vídeo para a tarefa de remoção do motor;
- A interface de diagnóstico e planejamento;
- Enquete de avaliação do uso da interface.

Nas questões relativas ao sistema de visualização, uma interface para auxílio ao planejamento da atividade de manutenção foi desenvolvida. As informações de manutenção da máquina foram extraídas de um banco de dados utilizado no sistema de manutenção da indústria e de documentos textos fornecidos pela mesma.

De posse dos modelos virtuais e CAD, foi assistida e filmada a operação de remoção e colocação do componente *spindle* do motor localizado no *milling_head*. Este vídeo foi armazenado como conteúdo multimídia para posterior utilização na interface. A Figura 35 mostra a operação de remoção do motor da máquina; e o componente *milling_head* que está sendo manipulado durante a operação, à direita da figura.

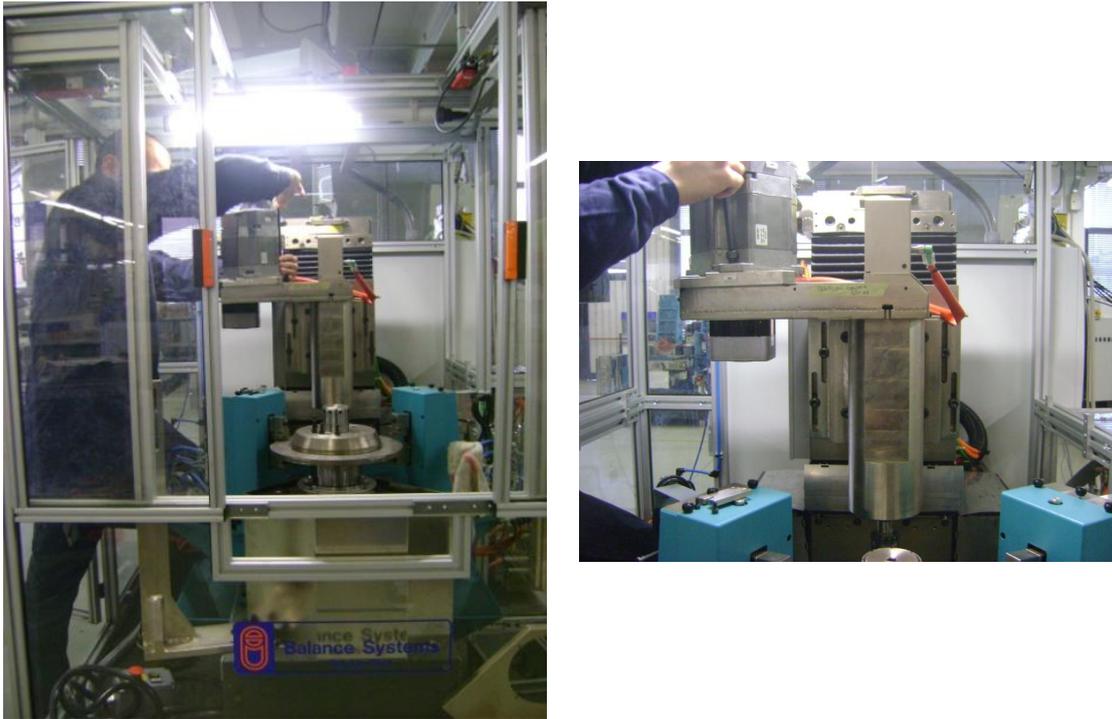


Figura 35 Operação de remoção do motor para manutenção; componente *milling_head*.

Primeiramente a partir do modelo CAD da máquina foi possível gerar o arquivo XML descritivo dos componentes do equipamento. De posse do arquivo XML estrutural do equipamento foi descrito o relacionamento dos componentes com os dados de manutenção e virtuais.

Os dados de manutenção utilizados foram arquivos textos extraídos da documentação fornecida pela empresa e informações de um banco de dados em uso na fábrica. Os dados virtuais obtidos foram modelos 3D, em formato 3DXML e VRML. Apenas os componentes manipulados durante a tarefa de manutenção assistida em chão de fábrica foram modelados virtualmente.

Na avaliação da visualização, utilizou-se a interface de diagnóstico em modo visualização virtual com navegação guiada usando dispositivo *desktop*. Mesmo os TAGs não tendo sido colocados na cena, eles foram configurados na interface para geração do mapeamento de TAGs para relação entre diferentes dados. A Figura 36 apresenta os modelos virtuais 3D gerados a partir do modelo CAD fornecido pela *Balance Systems*.

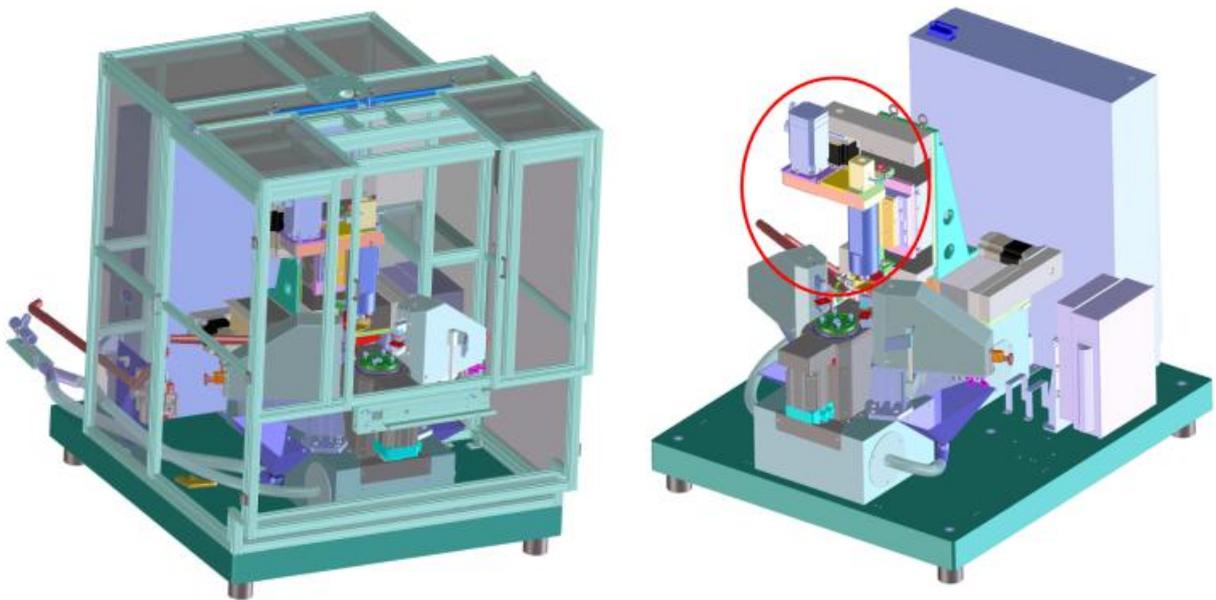


Figura 36 Modelos virtuais da máquina.

Uma vez que a tarefa de manutenção realizada para teste do sistema foi a remoção e colocação do motor, utilizou-se o modelo do componente *milling_head*, onde o motor está localizado, para descrição e integração de dados oriundos dos sistemas de manutenção e virtual. A Figura 37 representa a etapa de modelagem deste componente feita na ferramenta *SOLIDWORKS*.

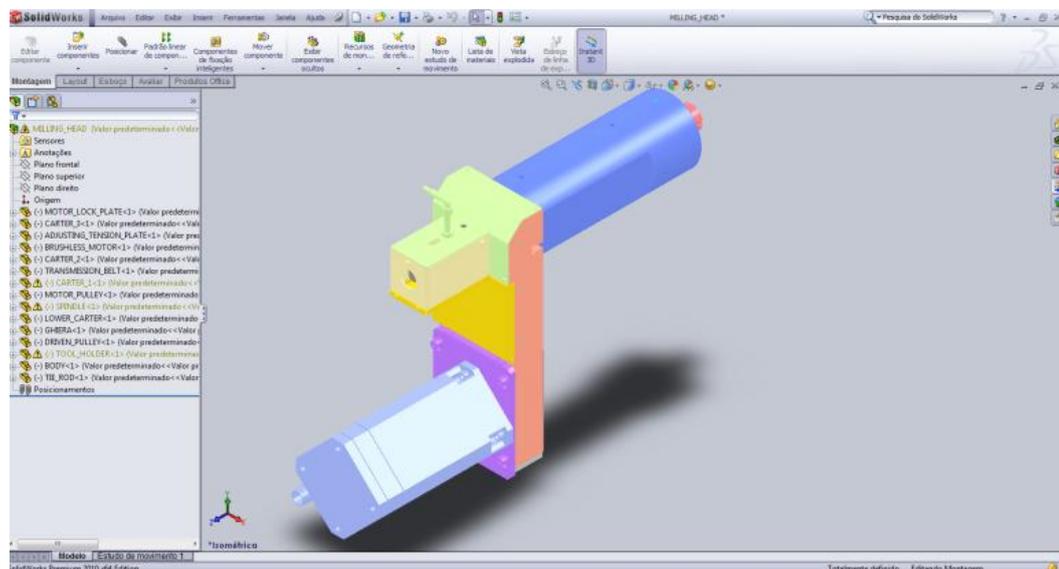


Figura 37 Modelo virtual do componente *milling_head*.

Abaixo a Figura 38 apresenta a interface de visualização testada para o estudo de caso da máquina.

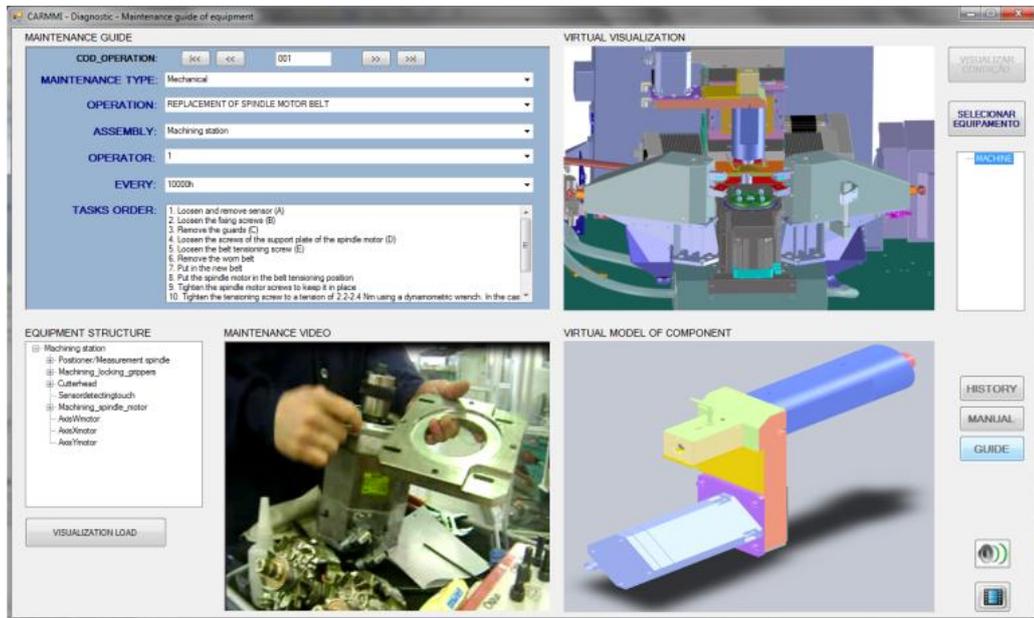


Figura 38 Interface de diagnóstico para visualização do guia de manutenção em modo de visualização virtual utilizando dispositivo *desktop*.

Para a avaliação desta interface foi elaborado uma enquete que foi respondida por cinco especialistas na área de manutenção. A Tabela 7 apresenta os resultados dessa enquete em termos de quatro questões. Para ponderar qualitativamente foram solicitados respostas no seguinte modelo:

- 1- insatisfeito
- 2- pouco satisfeito
- 3- satisfeito
- 4- muito satisfeito

Sendo as questões analisadas as seguintes:

- Fácil Navegação: os menus e botões de interação apresentados na interface atendem as demandas de visualização do guia de manutenção.
- Fácil Uso: o sistema é de fácil compreensão e intuitivo para utilização.
- Aparência Geral: as janelas de visualização são suficientes para o ambiente de navegação.
- Qualidade do conteúdo: os dados adquiridos e apresentados no sistema são suficientes para atividade de manutenção.

Tabela 7 Tabela avaliativa sobre o sistema de visualização.

| | Fácil Navegação | Fácil Uso | Aparência Geral | Qualidade do conteúdo |
|-----------|------------------------|------------------|------------------------|------------------------------|
| Usuário 1 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| Usuário 2 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| Usuário 3 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| Usuário 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Usuário 5 | 2 | 2 | 3 | 2 |

Embora a amostra não sendo significativa, devido a dificuldade de aplicação da enquete em chão de fábrica, algumas análises podem ser feitas das respostas obtidas. Os usuários que atuavam no estudo de caso em questão possuíam facilidade na manipulação da interface. A fácil utilização mostrou-se diretamente relacionada a navegação. A qualidade do conteúdo estava diretamente relacionada às saídas disponibilizadas pelos sistemas de manutenção e CAD fornecido pela empresa. Adaptações sugeriram reduzir a quantidade de informação apresentada pela interface da Figura 38.

Por fim, foi possível a validação do modelo CARMMI através da utilização do sistema de visualização; além disso, testes de uso do sistema com visualização mista em chão de fábrica são necessários para que adaptações nas interfaces atendam as demandas dos operadores.

7.4 ESTUDO DE CASO 4 - ESTUDOS SOBRE VÁLVULA COESTER UTILIZADA NA PETROBRÁS

Este estudo de caso validou todas as etapas de implementação. Questões no âmbito da modelagem e do sistema foram avaliadas em experimentos realizados no laboratório de Automação e Controle (LASCAR-UFRGS). Além disso, a adaptabilidade e portabilidade do modelo CARMMI foi testada com o uso de outros dados de manutenção e CAD.

O equipamento utilizado foi o atuador modelo CSR6 produzido pela empresa Coester e integrado ao módulo *Watchdog Agent* do sistema IMS (*Intelligent Maintenance System*). A Coester Automação desenvolve atuadores para a indústria de petróleo e gás brasileira. Sendo o atuador utilizado pela empresa Petrobrás, os experimentos realizados no âmbito desta Tese foram analisados e avaliados por operadores desta indústria.

O primeiro passo foi à instalação e teste do sistema *Watchdog Agent*. Para integração deste sistema com as interfaces de visualização mista, foram configurados os locais de entrada e saída de dados na *toolbox* do MATLAB fornecida pelo *Watchdog*. A Figura 39 apresenta a implantação física do módulo sistema preditivo e um dos gráficos de saída fornecido pelo sistema.

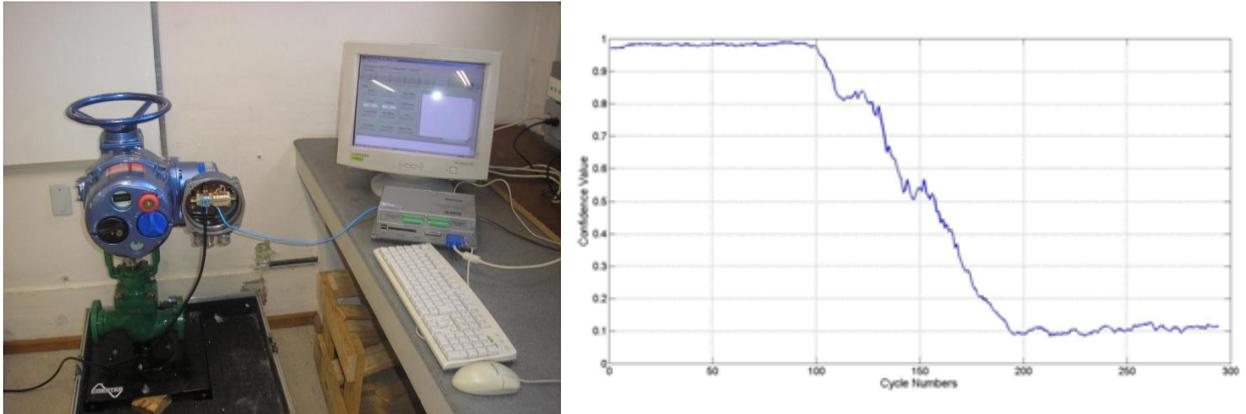


Figura 39 *Watchdog* com atuador CSR6 da Coester (esq). Valor de confiança obtido da análise de dados do sensor de abertura e fechamento (dir).

Em seguida, bancadas instrumentadas para testes com atuadores elétricos da Coester visando ensaios de vibração e torque foram montadas. A rede de atuadores elétricos é controlada por um programa supervisorio desenvolvido na linguagem *Delphi* e a instrumentação é feita através de acelerômetros *Kistler* modelo 8705A50M1 posicionados ao longo da bancada no atuador CSR6 em conjunto com o CompactRIO NI cRIO-9004 da *National Instruments* conforme Figura 40.



Figura 40 Bancada com os atuadores CSR6 e CSR50M.

O objetivo da criação dessas bancadas é simular diversas situações ocorridas em chão de fábrica prevendo, através do sistema de manutenção inteligente, possíveis comportamentos do equipamento e desta forma possibilitando uma melhor reparação ou adequação dos mesmos frente a situações de degradação.

Testes a respeito da integração de diferentes sistemas e utilização de interfaces avançadas de visualização para melhor planejamento e execução das operações de manutenção estão sendo realizadas junto a visitas periódicas de operadores da indústria.

A falha na abertura e fechamento da válvula é um dos principais problemas ocorridos na Petrobrás que resultam em altos prejuízos por minuto de parada, o que justifica a necessidade da implantação de um sistema de manutenção inteligente. A simulação da falha pode ser feita de diversas formas e busca simular o processo de degradação na atividade de abertura e fechamento da válvula.

Na Figura 39 à direita, o gráfico de degradação foi obtido pela colocação de um bastão de borracha na entrada da válvula impedindo o fechamento da mesma. Outra maneira de provocar a falha é o desalinhamento da bancada. Sendo a vibração um dos parâmetros possíveis para o diagnóstico de problemas e anormalidades foram utilizados acelerômetros para fazer a medição dos sinais de vibração no corpo da válvula. A Figura 41 mostra a instrumentação do atuador.



Figura 41 Posições dos acelerômetros. a) caixa de engrenagem; b) compartimento do motor elétrico; c) freio a disco.

Essas posições foram escolhidas porque indicam variações consideráveis quando a haste da válvula é submetida a um esforço principalmente em regimes críticos onde o torque se torna quase máximo. Para simular a degradação, primeiramente, foi alinhado o eixo do atuador elétrico com o eixo central da bancada gerando a curva demonstrada na Figura 42a.

Para gerar uma frenagem capaz de produzir um aumento do torque na haste do atuador elétrico a bancada foi propositalmente desalinhada. Um sistema proporcional pneumático a fim de garantir o fechamento do freio da bancada esta sendo desenvolvido, no entanto a solução mais rápida adotada primeiramente foi o desalinhamento. Esse esforço criado na haste gerou o gráfico da Figura 42b. Estes gráficos foram apresentados como dados de manutenção na interface de visualização.

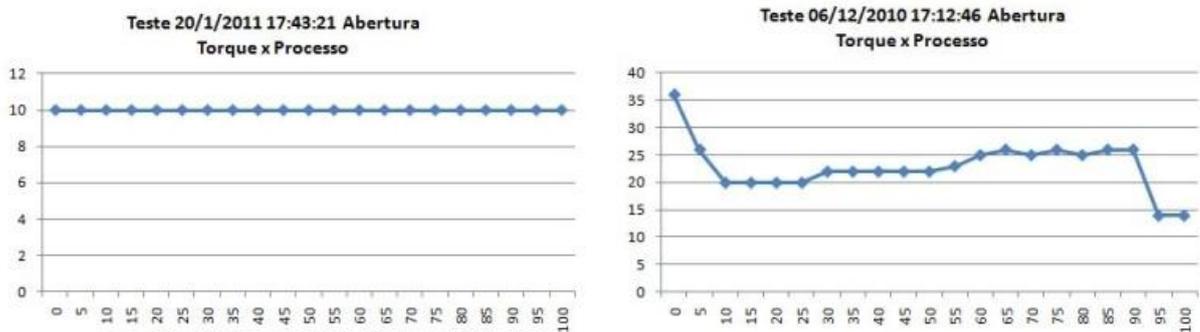


Figura 42 Curva de torque. a) bancada alinhada; b) bancada desalinhada.

Durante os experimentos, atendendo a requisições de operadores, uma interface adicional foi desenvolvida no sistema *Watchdog* (Figura 43 – esq.). Nesta interface o operador de manutenção gera um relatório com o estado dos atuadores que pode ser impresso ou visualizado em tela. Este relatório é gerado em formato de planilha eletrônica e destaca os atuadores em processo de degradação para o planejamento das próximas atividades de manutenção. É possível também visualizar os dados de atuadores específicos escolhendo na

listbox o atuador desejado. A Figura 43b apresenta o gráfico do valor de confiança para o sinal de vibração do atuador HV20073.

Estes dados gerados pelo sistema de manutenção inteligente são acessados através do sistema CARMMI de visualização. O sistema CARMMI gerencia a informação através da classe `MANAGER_INTEGRATOR` do modelo CARMMI e possibilita a integração das diversas informações oriundas dos sistemas CAX, de manutenção e virtual.

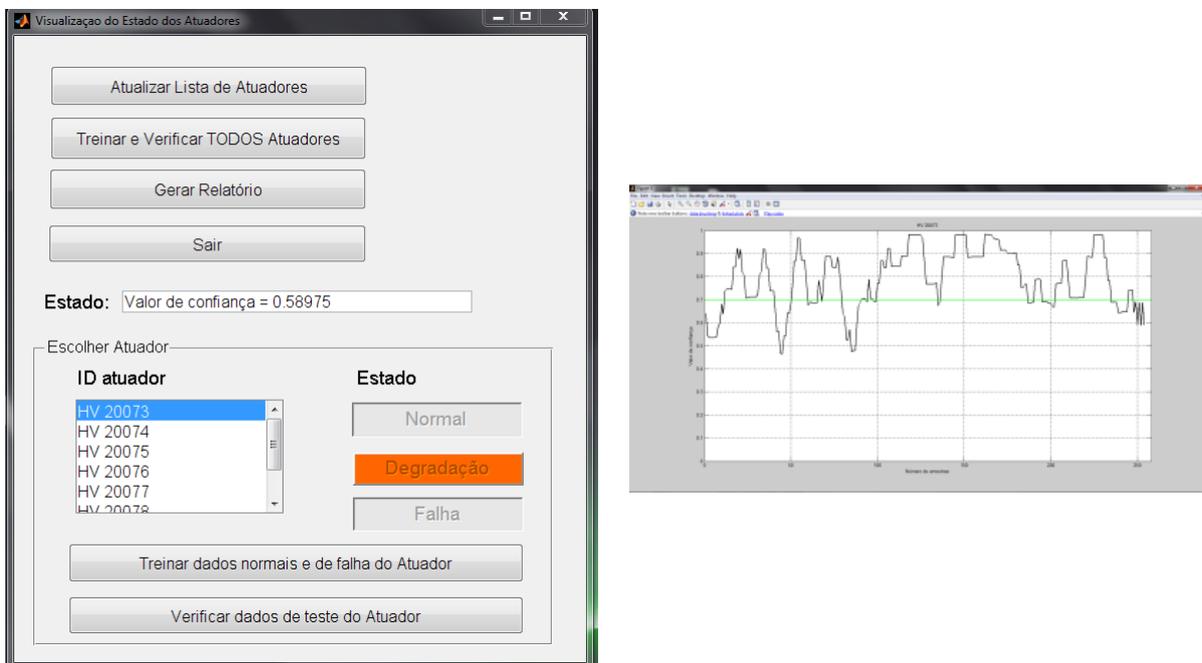


Figura 43 Interface do *Watchdog* modificada e saída gráfica do valor de confiança do sinal.

Através do sistema de visualização, os dados do modelo CAD do atuador, desenvolvido no `SOLIDWORKS` foram integrados as informações do sistema de manutenção inteligente *Watchdog Agent* e apresentados na interface de visualização. Uma das interfaces geradas pelo sistema foi testada pelo usuário em modo de visualização mista usando o dispositivo HMD conforme Figura 44.

Cada um dos cinco marcadores colocados na cena foram relacionados a componentes da bancada pela interface de configuração. O marcador D foi relacionado ao componente caixa de engrenagem do atuador e ao seu respectivo acelerômetro, para medição de torque e vibração na cadeia mecânica do atuador. O sensor relacionado a este componente foi o acelerômetro 8705A50M1 que realiza a transformação da vibração mecânica, no corpo da válvula, em sinais elétricos de tensão. Os dados do sistema MI são gráficos 2D mostrados sobre o marcador na cena e informações textuais extraídas do arquivo XML de descrição de modelo CAD.

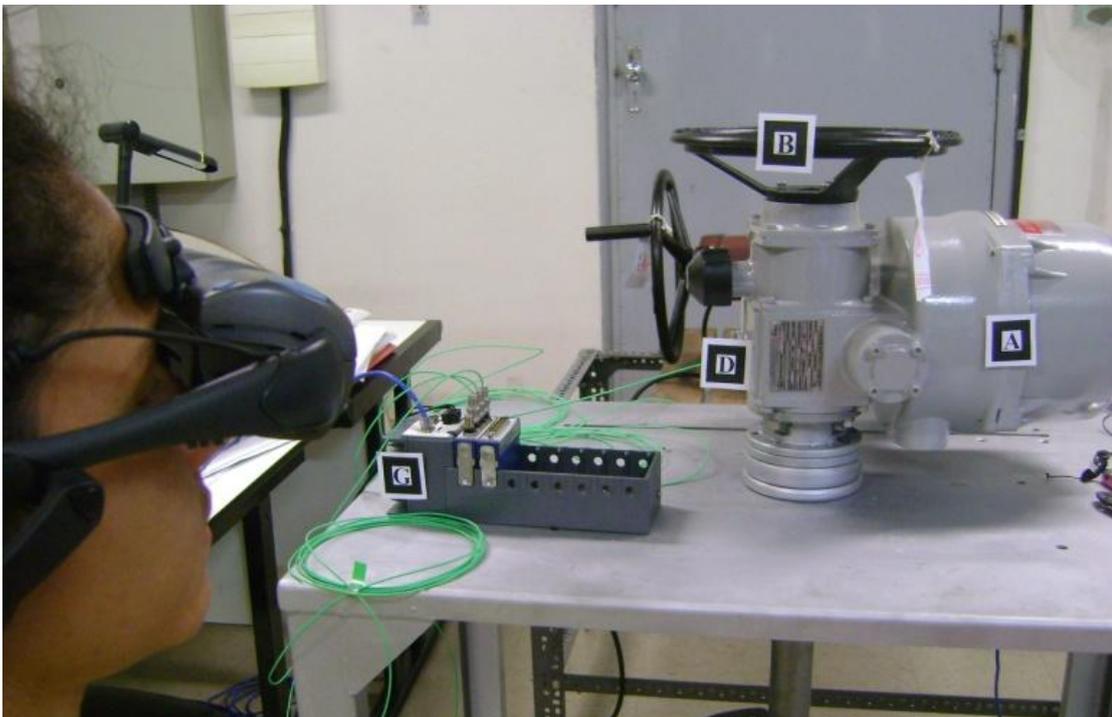


Figura 44 Experimento com operador utilizando dispositivo HMD.

A interface mista para visualização dos dados de manutenção durante a operação pode ser observada na Figura 45.

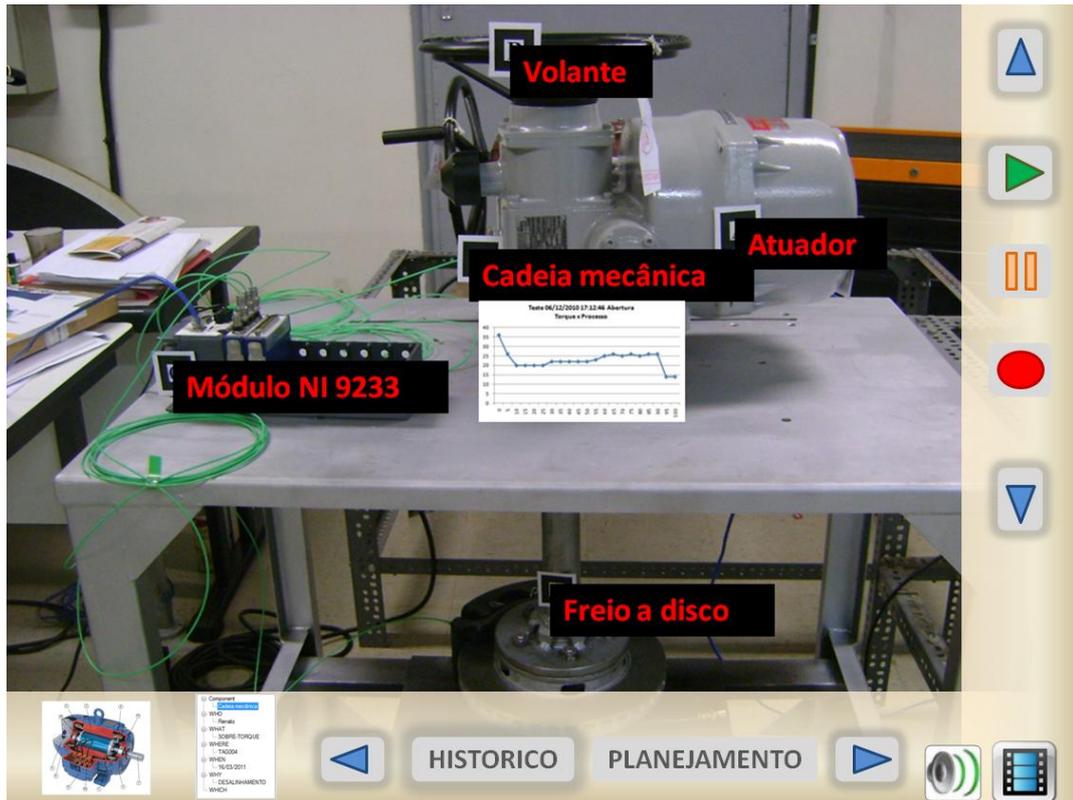


Figura 45 Teste da interface mista do sistema CARMMI utilizando HMD.

A interação foi realizada utilizando dispositivo convencional do tipo teclado. As teclas *PgUp*, *PgDn*, *Home*, *End* e *Enter*, são utilizadas para navegação na interface. Comandos de voz são pretendidos em trabalhos futuros para maior flexibilidade de interação na cena. O menu inferior esquerdo apresenta o modelo virtual do dispositivo aberto e a ordem de desmontagem. Ao lado, o histórico do equipamento é apresentado em formato texto.

As demais interfaces geradas neste estudo de caso foram descritas anteriormente no Capítulo 6, durante a validação experimental da interface e são mostradas novamente na Figura 46.



Figura 46 Interfaces do sistema CARMMI desenvolvidas no estudo de caso 4.

Em relação à modelagem foram obtidos:

- a estrutura XML do modelo *stp* do atuador;
- o modelo simples (com redução de complexidade) do atuador;
- o modelo virtual do atuador (*wrl*).

Em relação à visualização:

- testes de visualização mista usando dispositivo HMD e *desktop* foram realizados;
- o guia de manutenção, o manual do equipamento e o histórico de degradação constituíram os dados de manutenção apresentados na interface;
- aplicações de diagnóstico, segurança, planejamento e configuração foram desenvolvidas para o sistema de visualização.

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados foram sendo obtidos gradualmente em cada um dos estudos de caso anteriores. Durante o desenvolvimento da Tese trabalhos foram sendo desenvolvidos e publicados em congressos, seminários e *workshops*. Estes trabalhos estão descritos no apêndice B e listados na Tabela 8 desta seção.

Durante o referencial teórico os trabalhos “*O Uso de Realidade Aumentada em Sistemas de Manutenção Inteligente*” e “*Visualization of Intelligent Maintenance Systems Through Mixed Reality*” apontaram possíveis soluções em operações de manutenção através do uso de RM em sistemas de visualização. Estes trabalhos foram publicados em *X Symposium on Virtual and Augmented Reality - SVR2008* e nos *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry* respectivamente.

No decorrer do desenvolvimento da metodologia e da abordagem, capítulos 4 e 5, os artigos III, V e VIII, foram produzidos e apresentados em dois *workshops* e uma conferência (*Doctoral Winter Workshop on “Product and Asset Lifecycle Management – DWWPLM2009, 1st IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology - IFAC A-MEST'10 e 11th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises - MITIP2009*). Contribuições científicas na área de manutenção foram sendo coletadas a cada participação nestes eventos.

Os artigos IV, VI, VII, IX e X apresentaram as implementação e os resultados alcançados descritos nos capítulos 6 e 7. Estes artigos foram trabalhos completos disseminados nos eventos *4th e 5th World Congress on Engineering Asset Management 2009*

e 2010, XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA2010, *12th Brazilian Workshop on Real-Time and Embedded Systems – WTR2010* e *9th International Conference on Industrial Informatics, IEEE, INDIN2011*.

Os artigos XI, XII e XIII contemplam os resultados completos deste estudo no âmbito de dois focos: manutenção e computação. Estes trabalhos estão em processo de revisão para publicação nos periódicos da *Special Session on Computers in Industry - Elsevier*, *Transactions on Industry Applications – IEEE* e *Journal of Computer Science and Technology*.

Tabela 8 Resumo de disseminação dos trabalhos

| Trabalho | Evento | Ano |
|-------------|--|------|
| ARTIGO I | X Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR2008) - (publicado e apresentado) | 2008 |
| ARTIGO II | Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry (publicado) | 2008 |
| ARTIGO III | Doctoral Winter Workshop “Product and Asset Lifecycle Management” (PALM - DWW) - (publicado e apresentado) | 2009 |
| ARTIGO IV | 4th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM2009) - (publicado e apresentado) | 2009 |
| ARTIGO V | 11th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises (MITIP2009) - (publicado e apresentado) | 2009 |
| ARTIGO VI | XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA2010) - (publicado) | 2010 |
| ARTIGO VII | 12th Brazilian Workshop on Real-Time and Embedded Systems - (publicado) | 2010 |
| ARTIGO VIII | 1st IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology – (AMEST2010) - (publicado e apresentado) | 2010 |
| ARTIGO IX | 5th World Congress on Engineering Asset Management – (WCEAM2010) - (aceito para publicação) | 2010 |
| ARTIGO X | IEEE 9th International Conference on Industrial Informatics – (INDIN2011) - (aceito para publicação) | 2011 |
| ARTIGO XI | Journal of Computers in Industry - (aceito para publicação) | 2011 |
| ARTIGO XII | Journal of IEEE Transactions on Industry Applications – (em revisão) | 2011 |
| ARTIGO XIII | Journal of Computer Science and Technology – (em revisão) | 2011 |

A implantação da abordagem em estudos de caso reais da indústria mostrou-se importante na avaliação de técnicas, ferramentas, formatos e sistemas. Os testes de usabilidade realizados por profissionais de manutenção indicaram que apesar da qualidade visual estar relacionada à qualidade dos modelos virtuais adquiridos, a efetividade da informação (dado certo no local e momento certo) é o que realmente estabelece um ganho no uso de realidade mista na atividade de manutenção. Nesse sentido, o uso de um modelo para o gerenciamento da informação no sistema de visualização desenvolvido mostrou-se fundamental.

Em cada um dos estudos de caso, validações nas etapas de modelagem, integração e visualização foram sendo realizadas gradativamente mediante auxílio de operadores e especialistas na área de manutenção. No estudo de caso 1 - motor da Gerdau, o entendimento da complexidade do processo de manutenção em equipamentos críticos e a análise de modelos e sistemas utilizados na indústria contribuíram para a elaboração da idéia inicial da proposta de solução. Neste estudo de caso, os primeiros testes com a biblioteca ARToolkit e modelos virtuais em formato VRML foram realizados.

O estudo de caso da planta *Foundation FieldBus*, realizou os primeiros testes com o sistema de manutenção inteligente *Watchdog Agent* e indicou a necessidade de um modelo para gerenciamento e integração das diferentes informações. No estudo de caso 3 (*Balance Systems*), o modelo CAD fornecido pela empresa permitiu gerar um modelo relacional em XML para integração dos diferentes modelos de dados. Outro resultado obtido neste estudo de caso foram os testes para avaliação do sistema de visualização realizados por profissionais de manutenção. Por fim, o estudo de caso da válvula da Coester permitiu avaliar a abordagem em todos os estágios de desenvolvimento.

8 DISCUSSÕES FINAIS

Esta Tese apresentou uma metodologia para identificação das etapas de desenvolvimento necessárias à aplicação de um sistema de realidade mista para auxílio à atividade de manutenção. Baseado nesta metodologia definiu-se uma abordagem utilizando dados CAD e dados de um sistema de manutenção inteligente para potencializar os recursos oferecidos pela interface em termos de acesso e gerenciamento da informação.

Desta forma, foi proposto um modelo de integração de dados CAx, MI e RV – denominado CARMMI. Este modelo foi validado através da implementação de um sistema de visualização mista, elaborado gradativamente em quatro estudos de caso da indústria. Embora o modelo CARMMI seja a principal contribuição científica desta Tese, o diferencial deste trabalho está na consideração da “visão do operador” em chão de fábrica, para o desenvolvimento do sistema, e na generalidade da solução proposta.

Uma vez implantado um sistema de manutenção inteligente e tendo o modelo CAD do equipamento monitorado, é possível utilizar o sistema CARMMI para qualquer caso. A dinamicidade de conteúdos apresentada na interface de visualização, coordenada pela classe `MANAGER_INTEGRATOR` do modelo CARMMI, viabiliza a reutilização da proposta no âmbito de diferentes aplicações.

Quanto às limitações no uso da abordagem destacam-se: a etapa manual de conversão CAD-RV – é preciso realizar a etapa de modelagem previamente antes de instalar o sistema; a ARToolkit para rastreamento com marcadores possui implementação simples em termos de complexidade e bons resultados para ambientes estáticos e com baixo ruído, no entanto, a necessidade de validação em ambientes de baixa iluminação e dinâmicos faz-se necessária; a mobilidade do operador devido a utilização de dispositivos tipo HMD com fios, o que remete

a necessidade de pesquisas futuras para soluções em comunicação sem fio; e a exigência de programadores para instalação do sistema.

Apesar das limitações apontadas em relação à abordagem, nota-se que nenhuma destas inviabilizou a validação do modelo e a verificação dos conceitos apresentados. Estas dificuldades foram impostas pelo uso de tecnologias específicas que não restringiram nem a utilização do modelo CARMMI nem a do sistema apresentado.

Os ganhos na utilização de um sistema de manutenção inteligente integrado a interface mista referem-se à redução do tempo de inatividade do equipamento crítico da indústria. Com o sistema MI, é possível a interface apresentar, para o operador, os componentes em processo de degradação no momento em que o sistema detecta essa condição. Por outro lado o uso de modelos CAD permite identificar o componente monitorado dentro da estrutura da máquina para que o operador saiba o ponto de atuação exato durante a atividade de manutenção. O relacionamento dos modelos CAD, RV e MI viabilizaram o gerenciamento da informação de manutenção que é apresentado na interface.

Mesmo os trabalhos relacionados abordando o uso de realidade mista em atividades de manutenção, não são encontrados estudos detalhados sobre o gerenciamento da informação e o relacionamento de diferentes modelos de dados. Estes aspectos determinaram o desafio científico desta proposta. Ressalta-se ainda que atualmente não existem ferramentas que, de forma integrada, realizem tais procedimentos.

Por fim, embora o uso de técnicas de realidade mista não seja uma prática comum da indústria nacional, os crescentes avanços e a nova geração de ferramentas CAx com suporte a realidade virtual, apontam uma tendência de mudança para interfaces avançadas de visualização e interação homem-máquina. Os resultados alcançados e as discussões realizadas em eventos nacionais e internacionais através da publicação de trabalhos na área de

manutenção e manufatura evidenciam o interesse da indústria e da comunidade científica na linha de pesquisa deste trabalho.

8.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições obtidas com o desenvolvimento desta Tese atendem ao principal objetivo da mesma: fornecer um modelo de descrição e integração de diferentes tipos de dados para potencializar o uso de visualização mista em atividades de manutenção industrial.

- O modelo CARMMI (*Modelos CAx para integrar Realidade Mista em sistemas de Manutenção Inteligente*) descrito em UML e implementado em C++, para o relacionamento e gerenciamento de diferentes modelos de dados apresentados na interface mista de visualização.
- A possibilidade de expansão e adaptação do modelo devido à descrição UML, oferecendo suporte a reusabilidade, compatibilidade e portabilidade do modelo.
- O modelo conceitual para o entendimento da relação entre os domínios envolvidos: dados CAx, virtual e de manutenção; e para o desenvolvimento do modelo CARMMI.
- A metodologia para o desenvolvimento de visualização mista como interface de integração e gerenciamento de dados, uma vez que a maioria das soluções não descrevem os métodos para implementá-las.
- O sistema de visualização mista com aplicações de diagnóstico, segurança e planejamento para auxílio às operações de manutenção.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

Projetos de pesquisa nacionais e internacionais dão continuidade à exploração dos temas envolvidos no contexto desta Tese. A heterogeneidade de áreas dentro do escopo deste estudo leva a um amplo domínio de possíveis trabalhos futuros.

- Expandir as implementações abordando questões de comunicação *wireless* e armazenamento em banco de dados.
- Realizar testes de adaptação do modelo CARMMI para soluções no âmbito do paradigma “*Internet of Things*” como solução ao compartilhamento de informações pela internet e testes com o uso de RFID como TAGs de sobreposição.
- Testar o uso de dispositivos móveis tais como (PDA e celulares) como meio de visualização e interação com o sistema misto; e testar o uso do modelo CARMMI nestes dispositivos.
- Descrever o modelo conceitual, representado na Figura 16, através de ontologias, como maneira de formalizar a representação do conhecimento descrito neste diagrama.
- Explorar questões de usabilidade da interface considerando os paradigmas da interação homem-computador (IHC) para *design* e avaliação das interfaces desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- ALI, A.; CHEN, Z.; LEE, J. Web-enabled device-to-business platform for distributed and dynamic decision making systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Milwaukee, v. 38, n. 11-12, p. 1260-1270, 2002. DOI: 10.1007/s00170-007-1172-z.
- AMES, L.; NADEAU, R.; MORELAND, D. **VRML Sourcebook**. 2 ed. JOHN WISLEY AND SONS, 1997.
- APPEL, M.; NAVAB, N. Industrial Augmented Reality(IAR): challenges in design and commercialization of killer apps. In: IEEE AND ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 2., 7-10 Oct. 2003, Tokyo. **Proceedings...** Los Alamitos, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003. p. 2-6.
- BAE, Y.-H.; et al. A real-time intelligent multiple fault diagnostic system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Bedford, v.29, n.5-6, p.590-597, 2005. DOI: 10.1007/BF02729113.
- BAKOUROS, Y.; PANAGIOTIDOU, S.; VAMVALIS, C. Education and training needs in maintenance: how you conduct a self audit in maintenance management. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 4., 28-30 Sep. 2009, Atenas. **Proceedings...** London: Springer-Verlag Ltd., 2009. p.504-522.
- BANGEMANN, T.; et al. PROTEUS: creating distributed maintenance systems through an integration platform. **Journal Computers in Industry**, Amsterdam, v.57, n.6, p.539–551, Aug. 2006.
- BARATOFF, G.; REGENBRECHT, H. Developing and applying AR technology in design production, service, and training. In: ONG, S.K; NEE, A.Y.C. (Ed.). **VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY APPLICATIONS IN MANUFACTURING**. New York: Springer, 2004, p.207–236.
- BENBELKACEM, S.; et al. Augmented reality system for e-maintenance application. In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS AND AUTOMATION, 2., 23-25 Mar. 2009, Zarzis. **Proceedings...** Melville, v.1107, 2009. p. 185-189. DOI:10.1063/1.3106470.
- BUCCIOLI, A.; et al. Usando realidade virtual e aumentada na visualização da simulação de sistemas de automação industrial. In: SYMPOSIUM ON VIRTUAL REALITY, 8., 2006, Belém. **Proceedings...** Belem: CESUPA, 2006. p. 221-232.
- BYINGTON, C.S.; ROEMER, M.J. Selected prognostic methods with application to an integrated health management system. In: VALAVANIS, K. P. (Ed.). **Applications of**

intelligent control to engineering systems. Dordrecht: Springer, 2009. cap. 1, p. 3-21. DOI:10.1007/978-90-481-3018-4_1.

CARVALHO, F. M. D. **Metodologia de Manutenção Preditiva**. 2008. 62p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CASSINA, J. **ExtPLM: Extended Product Life Cycle Management**. 2008. 358p. Tese (Doutorado em Gerenciamento, Economia e Engenharia Industrial) – Dipartimento di Ingegneria Gestionale, Politecnico Di Milano, Milão, 2008.

CASSINA, J.; et al. Development of the semantic object model for a PDKM System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCURRENT ENTERPRISING, 12., 26 - 28 Jul. 2006, Milan. **Proceedings...** Milan: [s.n.], 2006. p. 383-390.

CASSINA, J.; et al. Development of promise data structure. In: KOCH, T. (Ed.) **Lean business systems and beyond**. Boston: Springer, 2008, v. 257. p. 101–110.

CHEN, H.; PERICH, F.; FININ, T.; JOSHI, A. SOUPA: Standard ontology for ubiquitous and pervasive applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE AND UBIQUITOUS SYSTEMS: NETWORKING AND SERVICES, 1., 2004, Boston. **Proceedings...** Cambridge: [s.n.], 2004. p. 258-267.

COMPORT, A.; MARCHAND, E.; CHAUMETTE, F. A real-time tracker for markerless augmented reality. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 2., 2003, Tokyo. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003. p. 36– 45.

DJURDJANOVIC, D.; LEE, J.; NI, J. Watchdog Agent: an infotonics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. **Journal Advanced Engineering Informatics**, Elsevier, v.17, n.3-4, p.109–125, 2003. DOI:10.1016/j.aei.2004.07.005.

DJURDJANOVIC, D.; NI, J.; LEE, J. Time-frequency based sensor fusion in the assessment and monitoring of machine performance degradation. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2002, New Orleans. **Proceedings...** New York: ASME, 2002, p. 17-22. DOI:10.1115/IMECE2002-32032.

FIALA, M. ARTag: a fiducial marker system using digital techniques. In: COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2005, San Diego. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005, v.2. p. 590–596. DOI:http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CVPR.2005.74.

FIORENTINO, M.; et al. Spacedesign: a mixed reality work-space for aesthetic industrial design. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 1., 2002, Darmstadt. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2002. p.86–95.

FIORENTINO, M.; MONNO, G.; UVA, A. E. Tangible digital master for product lifecycle management in augmented reality. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, Paris, v. 3, n. 2, p. 121-129, 2009. DOI:10.1007/s12008-009-0062-z .

FISHWICK, P. A. Toward an integrative multimodeling interface: a human-computer interface approach to interrelating model structures. **Simulation**: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, Thousand Oaks, v.80, n.9, p. 421-432, 2004. DOI: 10.1177/0037549704044081.

FOURSA, M. et al. INT-MANUS: revolutionary controlling of production processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER GRAPHICS AND INTERACTIVE TECHNIQUES ACM SIGGRAPH, 2006, Boston. **Proceedings...** New York: ACM, 2006, artigo-poster n. 161. DOI:10.1145/1179622.1179808.

FOURSA, M.; D'ANGELO, D.; NARAYANAN, R. Innovative control system for industrial environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, 4., 2008, Gosier. **Proceeding...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2008. p.82-87.

FRIEDRICH, W.; et al. ARVIKA - Augmented reality for development, production and service. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 1., 2002, Darmstadt. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2002. p. 3-4.

FUMAGALLI L.; et al. Diagnosis for Improved Maintenance Services: analysis of standards related to condition based maintenance. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 1., 28-30 Sept. 2009, Athens. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, 2009. p.928-936.

FUMAGALLI, L.; et al. Evaluating the role of maintenance maturity in adoption of new ICT in the process industry. In: IFAC WORKSHOP ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS, 9., 2008, Szczecin. **Proceedings...** Disponível em <<http://www.ifac-persononline.net/Detailed/42436.html>>. Acesso em: 11 jul. 2011.

GARCIA, E.; et al. A new industrial cooperative tele-maintenance platform. **Computers and Industrial Engineering**, Montreal, v.46, n.4, p.851-864, 2004. DOI:10.1016/j.cie.2004.05.019.

GABBAR H. A.; et al. Computer-aided RCM-based plant maintenance management system. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, London, v.19, n.5, p. 449-458, 2003. DOI:10.1016/S0736-5845(03)00031-0.

GEORGEL, P.; SCHROEDER, P.; NAVAB, N. Navigation tools for viewing augmented CAD models. **IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, v. 29, n. 6, p. 65-73, 2009, DOI:10.1109/MCG.2009.123.

GONÇALVES, L. F.; et al. Development of an intelligent maintenance system for electronic valves. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19., 2007, Brasília. **Proceeding...** Brasília: ABCM, 2007. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, L. F.; et al. Design of an embedded system for the proactive maintenance of electrical valves. In: IEEE/ACM/SBC/SBMICRO SYMPOSIUM ON INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS DESIGN, 22., 2009, Natal. **Proceeding...** Editora da USP, 2009. p.1-6.

GONÇALVES, L. F. **Desenvolvimento de um sistema de manutenção inteligente**. 2011. 233 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GRIMM, P.; et al. AMIRE - Authoring Mixed Reality. In: IEEE INTERNATIONAL AUGMENTED REALITY TOOLKIT WORKSHOP, 1., 2002, Darmstadt. **Proceeding...** Singapore: IEEE Systems, Man and Cybernetics Society, 2002. p. 1-2.
DOI:10.1109/ART.2002.1107008.

HARINGER, M.; REGENBRECHT, H. A pragmatic approach to Augmented Reality Authoring. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 2002, Darmstadt. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2002. p.237– 245.

HASSAINE, S.; et al. Generating visualization-based analysis scenarios from maintenance task descriptions. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON VISUALIZING SOFTWARE FOR UNDERSTANDING AND ANALYSIS, 5., 2009, Edmonton. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. p. 41-44.
DOI:10.1109/VISSOF.2009.5336423.

HAUSLADEN, I.; BECHHEIM, C. E-maintenance platform as a basis for business process integration. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 2., 2004, Berlin. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Inc., 2004. p. 46–51.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e práticas**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

HENDERSON, S.; FEINER, S. Opportunistic tangible user interfaces for augmented reality. **Transactions on Visualization and Computer Graphics**, Los Alamitos, v.16, n.1, p.4-16, 2010. DOI:10.1109/TVCG.2009.91.

HENDERSON, S.; FEINER, S. Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 8., 2009, Orlando. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Inc., 2009. p. 135-144.
DOI:10.1109/ISMAR.2009.5336486.

HOLMBERG, K.; HELLE, A.; HALME, J. Prognostics for industrial machinery availability. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON MAINTENANCE, CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTICS, 2005, Oulu. **Proceedings...** Oulu: Pohto, 2005. p.17-29.

HUNG, M.; et al. Development of an e-diagnostics/maintenance framework for semiconductor factories with security considerations. **Advanced Engineering Informatic**, Pittsburgh, v.17, n.3-4, p.165–178, 2003. DOI:10.1016/j.aei.2004.07.004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 60300 (3-14): dependability management, part 3-14: application guide, maintenance and maintenance support. Geneva, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION ISO/IEC15288:** systems engineering: system life cycle processes. Geneva, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 13374-1: condition monitoring and diagnostics of machines: data processing, communication and presentation, part 1: general guidelines. Geneva, 2003.

JARDINE, A.; et al. A hybrid diagnostics and prognostics platform. In: CONFERENCE ON CANADIAN MACHINERY AND VIBRATION ANALYSIS, 2004, Ottawa. **Proceedings...**Ottawa: [s.n.], 2004. p.176-187.

JAYARAM, S.; et al. Industry case studies in the use of immersive virtual assembly. **Virtual Reality**, London, v.11, n.4, p.217-228, 2007. DOI: 10.1007/s10055-007-0070-x.

KATO, H.; BILLINGHURST, M.; POUPYREV, I. **ARToolKit version 2.33** [S.1:s.n.], Manual de software, 2000. Disponível em: <<http://www.tinmith.net/lca2004/ARToolkit/ARToolKit2.33doc.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

KANS, M.; INGWALD, A. Analysing IT functionality gaps for maintenance management. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 4., 28-30 Sept. 2009, Athens. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, 2009. p.430-437.

KIRITSIS, D. Ubiquitous product lifecycle management using product embedded information devices. **Advanced Manufacturing An ICT and Systems Perspective**, London, v.1, n.1, p.65-78, 2007. DOI: 10.1201/9781439828328.ch6.

KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. A. Fundamentos de realidade virtual e aumentada. In: REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA: CONCEITOS, PROJETO E APLICAÇÕES. Porto Alegre: SBC, Sociedade Brasileira de Computação, 2007. p. 2–21.

KOÇ-M.; LEE, J. A system framework for next-generation e-maintenance system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2., 2001, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: Nihon Keizai Shinbun, 2001, p.11-15.

LAZZARETTI, E. P. **Implementação de um sistema de manutenção inteligente:** estudo de caso. 2007. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LAWSON J.-Y.; et al. An open source workbench for prototyping multimodal interactions based on off-the-shelf heterogeneous components. In: ENGINEERING INTERACTIVE COMPUTING SYSTEMS, 2009, Pittsburgh . **Proceedings...**New York: ACM, 2009. p. 245-254.

LEBOLD, M.; THURSTON, M. Open standards for condition-based maintenance and prognostic systems. In: ANNUAL MAINTENANCE AND RELIABILITY CONFERENCE, 5., 2001, Gatlinburg. **Proceedings...** Gatlinburg: [s.n.], 2001. p. 321–333.

LECAKES, G.; et al. Virtual reality platforms for integrated systems health management in a portable rocket engine test stand. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2008, Victoria. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008. p. 388-392. DOI:10.1109/IMTC.2008.4547066.

- LEE, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, London, v.19, n.6, p.501-507, 2003. DOI:10.1016/S0736-845(03)00060-7.
- LEE, J. A framework for web-enabled E-maintenance systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2., 2001, Tokyo. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001. p.450-459. DOI:10.1109/.2001.992398.
- LEE, J.; et al. A systematic approach for predictive maintenance service design: methodology and applications. **International Journal of Internet Manufacturing and Services**, Xi'an, v. 2, n.1, p. 76-94, 2009. DOI:10.1504/IJIMS.2009.031341.
- LEE, J. Design of self-maintenance and engineering immune systems for smarter machines and manufacturing systems. In: IFAC WORKSHOP ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEMS,10., 2010, Lisbon. **Preprints...**, Lisbon: [s.n.], 2010. p.3-13. DOI:10.3182/20100701-2-PT-4011.00003.
- LEE, J.; et al. Informatics platform for designing and deploying e-Manufacturing systems, **Collaborative design and planning for digital manufacturing**, London, v.1, n.1, 2009, p. 1-35.
- LEE, W.; PARK, J. Augmented foam: a tangible augmented reality for product design. In: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 2005, Vienna. **Proceedings...** New York: ACM, 2005. p.106-109.
- LEGER, J. A case study of remote diagnosis and e-maintenance information system. In: IFAC SYMPOSIUM ON COST ORIENTED AUTOMATION, 7., 2004, Gatinéau. **Proceedings...** Oxford: Elsevier, 2004. p.74-79.
- LI, F.; BROWN, R. A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v.19, n.1, p.439-441, 2004. DOI:10.1109/TPWRD.2003.820411.
- LIMA, J.; et al. Model based 3D tracking techniques for markless augmented reality. In: SYMPOSIUM ON VIRTUAL REALITY AND AUGMENTED REALITY, 11., 2009, Porto Alegre. **Proceedings...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2009. p. 37-47.
- LIU, J. **Signature analysis and tool condition assessment in drilling**. 2003. 187p. Dissertação (Mestrado) Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 2003.
- LIVERANI A.; G. AMATI; G. CALIGIANA. A CAD-augmented Reality Integrated Environment for Assembly Sequence Check and Interactive Validation. **Concurrent Engineering**, Sage, v.12, n.1, p.67-77, 2004. DOI: 10.1177/1063293X04042469.
- LIYANAGE J. P.; BADURDEEN F. Strategies for integrating maintenance for sustainable manufacturing: developing integrated platforms. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 4., 28-30 Sept. 2009, Athens. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, 2009. p. 308-315.
- LOK, B. Toward the merging of real and virtual spaces. **Communications of the ACM**, New York, v.47, n.8, p.48-53, 2004.

- MACCHIARELLA, M.; VINCENZI, D. Augmented reality in a learning paradigm for flight and aerospace maintenance training. In: IEEE DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE, 23., 2004, Salt Lake. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2004. p. 5.1.1 - 5.1.9. DOI:10.1109/DASC.2004.1391342.
- MACINTYRE, B.; et al. DART: a toolkit for rapid design exploration of augmented reality experiences. In: ANNUAL ACM SYMPOSIUM ON USER INTERFACE SOFTWARE AND TECHNOLOGY, 17., 2004, Santa Barbara. **Proceedings...** New York: ACM NY., 2004. p.197–206.
- MAKRI, A.; et al. ULTRA: An augmented reality system for handheld platforms, targeting industrial maintenance applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL SYSTEMS AND MULTIMEDIA, 11., 2005, Ghent. **Proceedings...** Ghent: [s.n.], 2005a. p. 432-437.
- MAKRI, A.; et al. ULTRA Light Augmented Reality Mobile System. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MIXED AND AUGMENTED REALITY, 4., 2005, Vienna. **Proceedings...** New York: ACM, 2005b. p. 94-99.
- MATHEW, A. et al. Reducing maintenance cost through effective prediction analysis and process integration. **Advances in vibration engineering**, Bangalore, v.5, n.2, p.87–96, 2006a.
- MATHEW, A.; et al. A review of the MIMOSA OSA-EAI database for condition monitoring systems. In: ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 1., 2006, Queensland. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, 2006b. p. 837-846. DOI:10.1007/978-1-84628-814-2_88.
- MILGRAM, P. et al. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: TELEMANIPULATOR AND TELEPRESENCE TECHNOLOGIES, 1994, Boston. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, v.2351, n.1, 1994a. p. 282-292.
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Transactions on Information Systems**, New York, v.E77-D, n.12, p.1-15, 1994b.
- MITCHELL, J.; et al. MIMOSA-four years later. **Sound vibrations**, London, v.32, n.11, p.12–21, 1998.
- MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN 0831131462.
- MOORE, W.; STARR, A. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritization of maintenance activities. **Journal of Computers in Industry**, Netherlands, v.57, n.6, p.595–606, 2006. DOI:10.1016/j.compind.2006.02.008.
- MULLER, A.; SUHNER, M.-C.; IUNG, B. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. **Reliability Engineering & System Safety**, London, v.93, n.2, p.234-253, 2008a. DOI:10.1016/j.res.2006.12.004.
- MULLER, A.; CRESPO, A. M.; IUNG, B. On the concept of e-maintenance: Review and current research. **Reliability Engineering & System Safety**, London, v.93, n.8, p. 1165-1187, 2008b. DOI:10.1016/j.res.2007.08.006.

NAKAJIMA, C.; N., I. A Support System for Maintenance Training by Augmented Reality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE ANALYSIS AND PROCESSING, 2003, 12., Mantova. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003. p.158-163.

NAVAB, N. Developing killer apps for industrial augmented reality. **Journal IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, v.24, n3, p.16–20, 2004. DOI:10.1109/MCG.2004.1297006.

NIEDERMAYER, D. An introduction to bayesian networks and their contemporary applications. **STUDIES in computational intelligence**. Heidelberg: Springer, 2008. p.117-130. DOI: 10.1007/978-3-540-85066-3_5.

OLIVEIRA, D.; et al. Virtual reality system for industrial training. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2007, Vigo. **Proceedings...** Los Alamitos: IEEE, 2007. p. 1715-1720. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374863.

OPENCV: OpenCV LibraryWiki Visual C++. Intel, 2000. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

OPENGL: Open Graphics Library. [S.l.]: Silicon Graphics Interface, 1997. Disponível em:<<http://www.opengl.org/about/overview/>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

OPENINTERFACE: Laboratório TELE da Université catholique de Louvain Bélgica, 2003. Disponível em: <<http://www.openinterface.org/home/>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

OSA-CBM. Specification 3.3.0, Machinery Information Management Open Systems Alliance, 2009. Disponível em: <<http://www.mimosa.org/?q=resources/specs/osa-cbm-v330>> Acesso em: 10 dez. 2011.

OSG. Openscenegraph, Introduction to the Openscenegraph: Robert Osfield, 2000. Disponível em: <<http://openscenegraph.sourceforge.net/documentation/OpenSceneGraph/doc/introduction.html>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

OSGART: ARToolkit for OpenSceneGraph. [S.l.]: HitLabNZ, 2006. Disponível em:<<http://www.artoolworks.com/community/osgart/>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

PARK M.; FISHWICK, P.A. Integrating dynamic and geometry model components through ontology-based inference. **Journal Simulation**, San Diego, v.81, n.12, p.795-813, 2005. DOI:10.1177/0037549705064359.

PERRITAZ, D. **Development of an augmented reality system**. Disponível em: <<http://la.epfl.ch/page-53085-en.html>>. Acesso em: maio de 2011.

PEZZOTTA, G.; CAVALIERI, S.; GAIARDELLI, P. Product-service engineering: state of the art and future directions. In: IFAC SYMPOSIUM ON INFORMATION CONTROL PROBLEMS IN MANUFACTURING, 13., 2009, Moscow. **Proceedings...** Moscow:[s.n.], 2009.

PEYSSON, F. et al. New approach to prognostic systems failures. In: IFAC WORLD CONGRESS, 17., 2008, Seoul. **Proceedings...** Disponível em < <http://www.ifac->

paperonline.net/Detailed/37858.html>. Acesso em: 11 jul. 2011. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02175.

PROVAN, G. An open systems architecture for prognostic inference during condition-based monitoring. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2003, Montana. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. p.3157-3164. DOI:10.1109/AERO.2003.1234159.

QUARLES, J.; et al. A mixed reality approach for merging abstract and concrete knowledge. **IEEE Virtual Reality**, Reno, p.27–34, 2008. DOI: 10.1109/VR.2008.4480746.

REGENBRECHT, H.; BARATOFF, G.; WILKE, W. Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries. **Journal IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, v.25, n.6, p.48-56, 2005. DOI:10.1109/MCG.2005.124.

RUSSELL, M. et al. Acquisition, interfacing and analysis of sensor measurements in a VR environment for integrated systems health management in rocket engine tests. In: IEEE SENSORS APPLICATIONS SYMPOSIUM, 2009, New Orleans. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p.128-131. DOI:10.1109/SAS.2009.4801792.

RUSINÁ, F.; TEMPERINI, S. Advanced maintenance strategies for a sustainable manufacturing environment. In: IFAC WORKSHOP ON ADVANCED MAINTENANCE ENGINEERING, SERVICES AND TECHNOLOGY, 1., 2010, Lisbon. **Proceedings...** Lisbon:[s.n.], 2010. p.14.

SCHAF, F.; PEREIRA, C. Integrating mixed-reality remote experiments into virtual learning environments using interchangeable components. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v.56, n.12, p. 4776-4783, 2009.

SCHLEGEL, T. et al. INT-MANUS: Interactive production control in a distributed environment. In: **HCI: Human-Computer Interaction - Applications and Services**. v.4553, Berlin: Springer, 2007, p.1150-1159. DOI: 10.1007/978-3-540-73111-5_126.

SCHMALSTIEG, D.; et al. The studierstube augmented reality project. **Journal Presence: Teleoperators and virtual environments**, Cambridge, v.11, n.1, p.33–54, 2002. DOI:10.1162/105474602317343640.

SCHOENFELDER, R.; SCHMALSTIEG, D. Augmented Reality for Industrial Building Acceptance. In: IEEE VIRTUAL REALITY CONFERENCE, 2008, Reno. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008. p. 83-90. DOI:10.1109/VR.2008.4480755.

SCHWALD, B.; et al. STARMATE: using augmented reality technology for computer guided maintenance of complex mechanical elements. In: eBUSINESS AND eWORK CONFERENCE, 2001, Venice. **Proceedings...** Venice: [s.n.], 2001. p.196–202.

SCHWALD, B.; LAVAL, B. An augmented reality system for training and assistance to maintenance in the industrial context. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN CENTRAL EUROPE ON COMPUTER GRAPHICS, VISUALIZATION AND COMPUTER VISION, 11., 2003, Plzen. **Proceedings...**Plzen: [s.n.], 2003. p. 425-432.

SERRANO, M.; et al. The OpenInterface framework: a tool for multimodal interaction. In: CHI 08 HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 2008, Florence. **Proceedings...** New York: ACM, 2008. p.3501-3506.

SONG, J.; et al. Study on the perception mechanism and method of virtual and real objects in augmented reality assembly environment. In: IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 4., 2009, Xi'an. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p.1452-1456.

SZALAVÁRI, Z.; et al. Studierstube : an environment for collaboration in augmented reality. **Virtual Reality**, London, 1998, p.37-48, DOI: 10.1007/BF01409796.

TORO, C.; et al. Knowledge based tools to support the structural design process. In: GABRYS, B., HOWLETT, R.J., JAIN, L.C. **Knowledge-based intelligent information and engineering systems**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. p.679-686. DOI:10.1007/11892960_82.

TORO C.; et al. Knowledge based industrial maintenance using portable devices and augmented reality. In: APOLLONI, B. **Knowledge-based intelligent information and engineering systems**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. p.295-302. DOI:10.1007/978-3-40-74819-9_37.

THURSTON, M. An open standard for web-based condition-based maintenance systems. In: IEEE SYSTEMS READINESS TECHNOLOGY CONFERENCE, 2001, Valey Forge. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. p.401-415. DOI:10.1109/AUTEST.2001.949021.

TRÄSKBÄCK, M.; Mixed reality training application for an oil refinery: user requirements. In: ACM SIGGRAPH INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIRTUAL REALITY CONTINUUM AND ITS APPLICATIONS IN INDUSTRY, 2004, Singapore. **Proceedings...** New York: ACM, 2004. p.324-327.

TSUTSUI, M.; TAKATA S. Life cycle maintenance planning system in consideration of operation and maintenance integration. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 4., 28-30 Sept. 2009, Athens. **Proceedings...** London: Springer-Verlag, 2009. p.316-325.

TUCCI M.; BETTINI G. Methods and tools for the reliability engineering: a plant maintenance perspective. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN MAINTENANCE MANAGEMENT, 2., 2006, Sorrento. **Proceedings...** Sorrento: [s.n.], 2006. p.98-105.

WAGNER, D. ARToolkitPlus, Augmented Reality on Truly Mobile Devices. 2004. Disponível em:<http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld_ar/artoolkitplus.php>. Acesso em: 13 jun. 2009.

WAGNER, M. **Design, prototypical implementation and testing of a real-time optical feature tracker**. 2001. 123p. Tese (Doutorado em Infomática) - Departamento de Ciência da Computação, Technische Universität München, Muchen, 2001.

WEIDENHAUSEN, J.; KNOEPFLE, C.; STRICKER, D. Lessons learned on the way to industrial augmented reality applications, a retrospective on ARVIKA. **Computers and Graphics**, London, v.27, n.6, p.887-891, 2003. DOI:10.1016/j.cag.2003.09.001.

WOHLWEND, H. et al. E-diagnostics guidebook: revision 2.1. In: TECHNOLOGY TRANSFER ENG, SEMATECH MANUFACTURING INITIATIVE, 2005. Disponível em:<<http://www.sematech.org>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

- X3D: Web3D Consortium, 2006. Disponível em: <<http://www.web3d.org/about/overview/>>. Acesso em: 13 jun. 2009.
- YAN, J.; KOÇ, M.; LEE, J. Predictive algorithm for machine degradation detection using logistic regression. **International Journal of Production Planning and Control**, London, v. 15, n. 8, p. 796–801, 2004.
- YAN, J.; LEE, J. Degradation assessment and fault modes classification using logistic regression. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Chicago, v.127, n.4, p.912-914, 2003. DOI:10.1115/1.1962019.
- YU, G.; et al. Performance prediction using recurrent neural network modeling with confidence bounds. In: INTELLIGENT MAINTENANCE SYSTEMS INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, Arles. **Proceedings...**Arles:[s.n.], 2004. p.34-65.
- YU, R.; IUNG, B.; PANETTO, H. A multi-agents based E-maintenance system with case-based reasoning decision support. **Engineering Application of Artificial Intelligence**, London, v.16, n.4, p.321–333, 2003. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00079-4.
- YUAN, S.; et al. Intelligent diagnosis in electromechanical operations systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2004, New Orleans. **Proceedings...** Piscaway: IEEE, 2004. p.2267-2272.
- UCKELMANN, D.; HARRISSON, M.; MICHAHELLES, F. An architectural approach towards the future internet of things. In: UCKELMANN, D. (Eds.). **Architecting the Internet of Things**. Berlin: Springer, 2011. p. 1-25. DOI:10.1007/978-3-642-19157-2.
- ULLMER, B.; H. ISHII. Emerging frameworks for tangible user interfaces. **Journal IBM Systems**, Riverton, v.39, n.3-4, p. 915-931, 2000. DOI:10.1147/sj.393.0915.
- ZENATI, N. et al. Assistance to maintenance in industrial process using an augmented reality System. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2004, Hammamet. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2004. p.848-852.

APÊNDICES:

Apêndice A: Códigos de implementação da abordagem.

APÊNDICE A: CÓDIGOS

Código A1 – Arquivo de configuração (gerado pela interface) do relacionamento entre tags e modelos virtuais (vrml_data.dat).

```
#número de pares a serem reconhecidos 6

#padrão 1
VRML   wrl/atuador.dat
Data/patt-a.dat
80.0
0.0 0.0

#padrão 2
VRML   wrl/volante.dat
Data/patt-b.dat
80.0
0.0 0.0

#padrão 3
VRML   wrl/freio.dat
Data/patt-c.dat
80.0
0.0 0.0

#padrão 4
VRML   wrl/cadeira.dat
Data/patt-d.dat
80.0
0.0 0.0

#padrão 5
VRML   wrl/modulo.dat
Data/patt-g.dat
80.0
0.0 0.0
```

Código A2 – Arquivo de configuração para definição dos modelos virtuais (patt-d.dat).

```
hv20511/datarv/wrl/cadeira.wrl      #objeto num 4
0.0 0.0 0.0                          #Translation - x,y,z from center of tracking pattern
90.0 1.0 0.0 0.0                      # Rotation angle + axis, eg 90.0 1.0 0.0 0.0
0.3 0.3 0.3                          # Escala X Y Z
```

Código A3 – Fragmento do arquivo XML – modelo relacional.

```

<CONFTAGList>
  <Tag_ID="001" EQ_ID="001" COMP_ID="001" sensor_ID="000V2"
  CAD_path="HV20511/001/DATACAD/" MI_path="HV20511/001/DATAMI/"
  RV_path="HV20511/001/DATARV/" />
  <Tag_ID="002" EQ_ID="001" COMP_ID="002" sensor_ID="000A5"
  CAD_path="HV20511/002/DATACAD/" MI_path="HV20511/002/DATAMI/"
  RV_path="HV20511/002/DATARV/" />
  <Tag_ID="003" EQ_ID="001" COMP_ID="003" sensor_ID="00A5W"
  CAD_path="HV20511/003/DATACAD/" MI_path="HV20511/003/DATAMI/"
  RV_path="HV20511/003/DATARV/" />
  <Tag_ID="004" EQ_ID="001" COMP_ID="004" sensor_ID="A50M1"
  CAD_path="HV20511/004/DATACAD/" MI_path="HV20511/004/DATAMI/"
  RV_path="HV20511/004/DATARV/" />
  <Tag_ID="005" EQ_ID="002" COMP_ID="001" sensor_ID="000V0"
  CAD_path="MODULE/001/DATACAD/" MI_path="MODULE/001/DATAMI/"
  RV_path="MODULE/001/DATARV/" />
</CONFTAGList>

<TAGList>
  <Tag_ID="001" Type="patt-a.dat" MI_ID="001" CAD_ID="001" RV_ID="001" />
  <Tag_ID="002" Type="patt-b.dat" MI_ID="002" CAD_ID="002" RV_ID="002" />
  <Tag_ID="003" Type="patt-c.dat" MI_ID="003" CAD_ID="003" RV_ID="003" />
  <Tag_ID="004" Type="patt-d.dat" MI_ID="004" CAD_ID="004" RV_ID="004" />
  <Tag_ID="005" Type="patt-g.dat" MI_ID="005" CAD_ID="005" RV_ID="005" />
</TAGList>

<CADList>
  <CAD_ID="001" EQ_name="HV20511" COMP_name="ACTUATOR"
  Attributes_file="actuator.txt" Structure_file="actuator.dat" />
  <CAD_ID="002" EQ_name="HV20511" COMP_name="HANDWHEEL"
  Attributes_file="handwheel.txt" Structure_file="handwheel.dat" />
  <CAD_ID="003" EQ_name="HV20511" COMP_name="BRAKE" Attributes_file="brake.txt"
  Structure_file="brake.dat" />
  <CAD_ID="004" EQ_name="HV20511" COMP_name="CHAINMEC" Attributes_file="chain.txt"
  Structure_file="chain.dat" />
  <CAD_ID="005" EQ_name="MODULE" COMP_name="MODULE" Attributes_file="module.txt"
  Structure_file="module.dat" />
</CADList>

<RVList>
  <RV_ID="001" RV_name="Atuador" modelRV_name="actuator.wrl"
  video_name="actuator.avi" />
  <RV_ID="002" RV_name="Volante" modelRV_name="handwheel.wrl" video_name="" />
  <RV_ID="003" RV_name="Freio a disco" modelRV_name="brake.wrl" video_name="" />
  <RV_ID="004" RV_name="Cadeia Mecânica" modelRV_name="mecan-chain.wrl"
  video_name="cadeia.avi" />
  <RV_ID="005" RV_name="Módulo NI 9233" modelRV_name="module.wrl" video_name="" />
</RVList>

<MIList>
  <MI_ID="001" Alarm_ID="0" audio_name="inst_actuator.wav" hist_file=""
  diag_file="" report_file="" />
  <MI_ID="002" Alarm_ID="0" audio_name="" hist_file="" diag_file=""
  report_file="" />
  <MI_ID="003" Alarm_ID="0" audio_name="" hist_file="" diag_file=""
  report_file="" />
  <MI_ID="004" Alarm_ID="1" audio_name="inst_cadeia.wav" hist_file="cadeia.txt"
  diag_file="cadeia.jpg" report_file="cadeia.xlsx" />
  <MI_ID="005" Alarm_ID="0" audio_name="" hist_file="" diag_file=""
  report_file="" />
</MIList>

```

```

<CONTENTList>
  <Tag_ID="001" object_set[0]="1" path_obj="HV20511/001/DATARV/MODEL/" />
  <Tag_ID="001" object_set[1]="1" path_obj="HV20511/001/DATARV/VIDEO/" />
  <Tag_ID="001" object_set[2]="1" path_obj="HV20511/001/DATARV/TEXT/" />
  <Tag_ID="001" object_set[3]="1" path_obj="HV20511/001/DATACAD/ATTRI/" />
  <Tag_ID="001" object_set[4]="1" path_obj="HV20511/001/DATACAD/STRUC/" />
  <Tag_ID="001" object_set[5]="1" path_obj="HV20511/001/DATAMI/AUDIO/" />
  <Tag_ID="001" object_set[6]="0" path_obj="HV20511/001/DATAMI/HIST/" />
  <Tag_ID="001" object_set[7]="0" path_obj="HV20511/001/DATAMI/DIAG_DEG/" />
  <Tag_ID="001" object_set[8]="0" path_obj="HV20511/001/DATAMI/REPORT_DEC/" />
  <Tag_ID="002" object_set[0]="1" path_obj="HV20511/002/DATARV/MODEL/" />
  <Tag_ID="002" object_set[1]="0" path_obj="HV20511/002/DATARV/VIDEO/" />
  <Tag_ID="002" object_set[2]="1" path_obj="HV20511/002/DATARV/TEXT/" />
  <Tag_ID="002" object_set[3]="1" path_obj="HV20511/002/DATACAD/ATTRI/" />
  <Tag_ID="002" object_set[4]="1" path_obj="HV20511/002/DATACAD/STRUC/" />
  <Tag_ID="002" object_set[5]="0" path_obj="HV20511/002/DATAMI/AUDIO/" />
  <Tag_ID="002" object_set[6]="0" path_obj="HV20511/002/DATAMI/HIST/" />
  <Tag_ID="002" object_set[7]="0" path_obj="HV20511/002/DATAMI/DIAG_DEG/" />
  <Tag_ID="002" object_set[8]="0" path_obj="HV20511/002/DATAMI/REPORT_DEC/" />
  <Tag_ID="003" object_set[0]="1" path_obj="HV20511/003/DATARV/MODEL/" />
  <Tag_ID="003" object_set[1]="0" path_obj="HV20511/003/DATARV/VIDEO/" />
  <Tag_ID="003" object_set[2]="1" path_obj="HV20511/003/DATARV/TEXT/" />
  <Tag_ID="003" object_set[3]="1" path_obj="HV20511/003/DATACAD/ATTRI/" />
  <Tag_ID="003" object_set[4]="1" path_obj="HV20511/003/DATACAD/STRUC/" />
  <Tag_ID="003" object_set[5]="0" path_obj="HV20511/003/DATAMI/AUDIO/" />
  <Tag_ID="003" object_set[6]="0" path_obj="HV20511/003/DATAMI/HIST/" />
  <Tag_ID="003" object_set[7]="0" path_obj="HV20511/003/DATAMI/DIAG_DEG/" />
  <Tag_ID="003" object_set[8]="0" path_obj="HV20511/003/DATAMI/REPORT_DEC/" />
  <Tag_ID="004" object_set[0]="1" path_obj="HV20511/004/DATARV/MODEL/" />
  <Tag_ID="004" object_set[1]="1" path_obj="HV20511/004/DATARV/VIDEO/" />
  <Tag_ID="004" object_set[2]="1" path_obj="HV20511/004/DATARV/TEXT/" />
  <Tag_ID="004" object_set[3]="1" path_obj="HV20511/004/DATACAD/ATTRI/" />
  <Tag_ID="004" object_set[4]="1" path_obj="HV20511/004/DATACAD/STRUC/" />
  <Tag_ID="004" object_set[5]="1" path_obj="HV20511/004/DATAMI/AUDIO/" />
  <Tag_ID="004" object_set[6]="1" path_obj="HV20511/004/DATAMI/HIST/" />
  <Tag_ID="004" object_set[7]="1" path_obj="HV20511/004/DATAMI/DIAG_DEG/" />
  <Tag_ID="004" object_set[8]="1" path_obj="HV20511/004/DATAMI/REPORT_DEC/" />
  <Tag_ID="005" object_set[0]="1" path_obj="MODULE/001/DATARV/MODEL/" />
  <Tag_ID="005" object_set[1]="0" path_obj="MODULE/001/DATARV/VIDEO/" />
  <Tag_ID="005" object_set[2]="1" path_obj="MODULE/001/DATARV/TEXT/" />
  <Tag_ID="005" object_set[3]="1" path_obj="MODULE/001/DATACAD/ATTRI/" />
  <Tag_ID="005" object_set[4]="1" path_obj="MODULE/001/DATACAD/STRUC/" />
  <Tag_ID="005" object_set[5]="0" path_obj="MODULE/001/DATAMI/AUDIO/" />
  <Tag_ID="005" object_set[6]="0" path_obj="MODULE/001/DATAMI/HIST/" />
  <Tag_ID="005" object_set[7]="0" path_obj="MODULE/001/DATAMI/DIAG_DEG/" />
  <Tag_ID="005" object_set[8]="0" path_obj="MODULE/001/DATAMI/REPORT_DEC/" />
</CONTENTList>

```

CÓDIGO A4 – Rotina para testar renderização de modelos vrml.

```

/* carrega os dados dos objetos - marcadores treinados e mapas de
bits associados */
if ((object = read_VRMLdata(model_name, &objectnum)) == NULL )
exit(0);
printf("Objectfile num = %d\n", objectnum);

/* testa a renderização de todos os objetos VRML */
printf("about to render VRML objects \n");
glEnable(GL_TEXTURE_2D);
for ( i = 0; i < objectnum; i++ ) {
printf("rendering %d \n",i);
arVrml97Draw( object[i].vrml_id );
}
glDisable(GL_TEXTURE_2D);

```

```
/* inicializa a iluminação */  
init_lights();
```

CÓDIGO A5 – Rotina para verificação do valor de confiança para exibição do objeto.

```
/* verifica se o objeto deve ou não ser visível */  
for (i = 0; i < objectnum; i++ ) {  
    k = -1;  
    for (j = 0; j < marker_num; j++ ) {  
        if (object[i].id == marker_info[j].id ) {  
            if (k == -1 )  
                k = j;  
            else {  
                if (marker_info[k].cf < marker_info[j].cf )  
                    k = j;  
            }  
        }  
    }  
    if (k == -1 ) {  
        object[i].visible = 0;  
        continue;  
    }  
}
```

APÊNDICE B: LISTA DE ARTIGOS

- ARTIGO I. ESPÍNDOLA, D. B.; PEREIRA, C. E. “*O uso de Realidade Aumentada em Sistemas de Manutenção Inteligente*”. In: **X Symposium on Virtual and Augmented Reality - SVR2008**, 2008, João Pessoa. Proceedings of the X Symposium on Virtual and Augmented Reality - SVR 2008, 2008. p. 54-58. (Publicado)
- ARTIGO II. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, PINHO, Marcio. “*Visualization of Intelligent Maintenance Systems Through Mixed Reality*” In: **Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry**, 2008, Biopolis-Singapore. ACM SIGGRAPH, 2008. v.1. p.203 – 204. (Publicado)
- ARTIGO III. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno. “*Intelligent Maintenance Systems Through Mixed Reality*”. Apresentação Oral no(a) **Doctoral Winter Workshop on “Product and Asset Lifecycle Management”** – DWWPLM2009 - Aprica - Italy, 2009. (Publicado)
- ARTIGO IV. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, PINHO, Marcio. “*IM:MR - A Tool for integration of data from different formats*”. In: **4th World Congress on Engineering Asset Management**, 2009, 2009, Athens, Greece. London: Springer-Verlag London Ltd, September - 2009. v.1. p.620 – 626. (Publicado)
- ARTIGO V. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo. “*A solution for integration of IM and MR data*”. In: **11th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises - MITIP2009**, 2009, Bergamo, Italy. Università degli Studi di Bergamo, October - 2009. v.1. p.423 - 430. <http://www.mitip2009.org/> (Publicado)
- ARTIGO VI. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, HENRIQUES, Renato Ventura Bayan, BOTELHO, Silvia Silva da Costa. “*A Visualização Mista nos Sistemas de Automação de Processos de Manutenção Preditiva de Máquinas da Indústria*” In: **XVIII Congresso Brasileiro de Automatica CBA 2010**, 2010, Bonito, Brasil. p.3021 – 3022. (Publicado)
- ARTIGO VII. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, HENRIQUES, Renato Ventura Bayan, BOTELHO, Silvia Silva da Costa. “*Uma Proposta para Visualização Aumentada em Tempo_real Aplicada a Indústria*” In: **12th Brazilian Workshop on Real-Time and Embedded Systems – WTR2010**, 2010, Gramado, Brasil, 2010. p.163 – 168. (Publicado)
- ARTIGO VIII. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, HENRIQUES, Renato Ventura Bayan, BOTELHO, Silvia Silva da Costa. “*Using Mixed Reality in the Visualization of Maintenance Processes*”. In: **1st IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology - IFAC A-MEST'10**, 2010, 2010, Lisboa. (Publicado)
- ARTIGO IX. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, PEREIRA, Carlos Eduardo, HENRIQUES, Renato Ventura Bayan, BOTELHO, Silvia Silva da Costa. “*Visualization Management of Industrial Maintenance Data Using Augmented Reality*”, In: **5th World Congress on Engineering Asset Management**, 2010, Brisbane Queensland, Australia. (Aceito para publicação)

- ARTIGO X. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, FUMAGALLI, Luca, GARETTI, Marco, BOTELHO, Silvia Silva da Costa, PEREIRA, Carlos Eduardo. “*An Adaption of OSA-CBM Architecture for Human-Computer Interaction through Mixed Interface*”. In: **IEEE 9th International Conference on Industrial Informatics**. Caparica, Lisbon, Portugal, July – 2011. (Aceito para publicação – qualis A1 – eng IV)
- ARTIGO XI. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, DUARTE, Nelson Lopes, BOTELHO, Silvia Silva da Costa, PEREIRA, Carlos Eduardo. “*Internet of Things in Product-Service Systems – A new paradigm in Service Engineering*” In **Special Session on Computers in Industry**, March-2011. (Aceito para publicação – qualis A2 – eng III e B1 comp.)
- ARTIGO XII. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, FUMAGALLI, Luca, GARETTI, Marco, BOTELHO, Silvia Silva da Costa, HENRIQUES, Renato Ventura Bayan, PEREIRA, Carlos Eduardo. “*A Model-based Integration Using Mixed Reality to Improve Maintenance Management*”, April-2011. (Em processo de revisão para submissão no journal IEEE Transactions on Industry Applications – qualis A1)
- ARTIGO XIII. ESPÍNDOLA, Danúbia Bueno, DUARTE, Nelson Lopes, BOTELHO, Silvia Silva da Costa, PEREIRA, Carlos Eduardo. “*A methodology for generation and visualization of virtual content in the maintenance tasks.*”, April-2011. (Em processo de revisão para submissão no Journal of Computer Science and Technology – qualis A2)