

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

ERICH LACERDA MALINOWSKI

**UM APLICATIVO PARA A EXECUÇÃO DE SISTEMAS
ESPECIALISTAS NO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA
MANUTENÇÃO**

DISSERTAÇÃO

**PONTA GROSSA
2012**

ERICH LACERDA MALINOWSKI

**UM APLICATIVO PARA A EXECUÇÃO DE SISTEMAS
ESPECIALISTAS NO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA
MANUTENÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Área de Concentração: Produção e Manutenção.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2012

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.33/12

M251 Malinowski, Erich Lacerda

Um aplicativo para a execução de sistemas especialistas no planejamento e controle da manutenção / Erich Lacerda Malinowski. -- Ponta Grossa: [s.n.], 2012. 77 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2012.

1. Sistemas especialistas. 2. Manutenção - Planejamento. 3. Manutenção - Controle. 4. Lógica Fuzzy. 5. Inteligência artificial. I. Behainne, Jhon Jairo Ramirez. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. III. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 205/2012

**UM APLICATIVO PARA A EXECUÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS NO
PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO**

por

Erich Lacerda Malinowski

Esta dissertação foi apresentada às 09 horas de 23 de julho de 2012 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal (PUC-PR)

Prof. Dr. Flavio Trojan (UTFPR)

Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino (UTFPR)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(UTFPR) - *Orientador*

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos em minha vida.

À minha mãe Idever, pelos incentivos, palavras de conforto e grande responsável pelo meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

À minha irmã Millien, pelo carinho e apoio incondicional para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha avó Ilda, pelo carinho e confiança.

À minha namorada Natália, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu orientador, professor Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, pelas contribuições, disponibilidade e por não ter medido esforços para me apoiar em todos os momentos deste percurso.

Ao professor Dr. Rui Francisco Martins Marçal, pela confiança, apoio incondicional e conhecimentos compartilhados para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Mayara Cristina Ghedini da Silva, Rodolfo Reinaldo Petter, Ricardo Baran e Fábio dos Santos Mello, pelo companheirismo e pelas horas dedicadas nesta trajetória.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização desta pesquisa: Docentes, Funcionários da Secretaria de Pós-Graduação, Família, Amigos e Colegas. Gostaria de deixar registrada aqui a minha gratidão e a importância de todo o apoio para vencer este desafio.

RESUMO

MALINOWSKI, Erich Lacerda. **Um Aplicativo para a Execução de Sistemas Especialistas no Planejamento e Controle da Manutenção**. 2012. 77 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2012.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aplicativo para a execução de Sistemas Especialistas baseados em Lógica *Fuzzy*, a fim de auxiliar gestores no diagnóstico do funcionamento de equipamentos e na determinação do momento ótimo da intervenção ou manutenção dos mesmos. O estudo teve como motivação a necessidade de superar algumas características do Sistema Especialista DEMOI, desenvolvido e executado na ferramenta *Logic Fuzzy Toolbox* do ambiente Matlab™. Assim, uma ferramenta em linguagem JAVA e C foi elaborada visando a obtenção de uma melhora no tempo de processamento das informações e a integração direta entre Sistemas Especialistas de monitoramento e de planejamento próprias das operações de manutenção. No desenvolvimento deste trabalho foram consideradas as etapas correspondentes aos testes preliminares de operação do sistema especialista já existente, bem como a elaboração do aplicativo proposto. Os resultados das simulações, realizadas sobre um caso prático de análise de vibração de uma máquina rotativa, mostraram os benefícios do novo aplicativo, principalmente na redução considerável no tempo de retorno para diagnósticos envolvendo elevadas quantidades de variáveis e regras de inferências. Adicionalmente, com a introdução da ferramenta, foi propiciado um ambiente de integração entre Sistemas Especialistas de monitoramento e planejamento da manutenção, que poderá ser utilizado por gestores sem as limitações existentes em aplicativos ou recursos de *softwares* comerciais.

Palavras-chave: Sistemas Especialistas. Planejamento e Controle da Manutenção Lógica *Fuzzy*. Inteligência Artificial.

ABSTRACT

MALINOWSKI, Erich Lacerda. **An application for the execution of Expert Systems on the Planning and Control of the Maintenance.** 2012. 77 f.
Dissertation (Master in Production Engineering) – Graduate Program in Production Engineering, Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2012.

In this study, a development of an application for the execution of Expert Systems based on the Fuzzy Logic is carried out in order to help managers on the diagnosis of the operation of equipments and on the determination of the best moment for doing intervention or maintenance. The research had as motivation the necessity to overcome some characteristics of the Expert System DEMOI, developed and executed in the tool Fuzzy Logic Toolbox of the environment Matlab™. So, a tool in language JAVA and C was developed aiming to get an improvement in the processing time of the informations and the integration between Expert Systems of monitoring and planning of maintenance operations. For developing this research were considered preliminary tests of operation of the Expert Systems linked to Matlab software, as well as the development steps of the proposed application. The results of the simulations, carried out on a practical case of analysis of vibration of a rotary machine, showed the benefits of the new application, principally when the processing time was evaluated. In this sense, a considerable reduction in time of return for diagnoses with elevated quantities of variables and inferences rules was possible by using the new tool. Additionally, with the introduction of the application was provided an environment of integration between Expert Systems of monitoring and planning of the maintenance, which can be used for managers without the limitations present in applications of commercial softwares.

Keywords: Expert Systems. Maintenance Planning and Control. Fuzzy Logic. Artificial Intelligence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura típica de um sistema baseado em conhecimentos	25
Figura 2 – Variável lingüística Temperatura e seus respectivos termos	29
Figura 3 - Funções de pertinência empregadas a variável “Altura”	30
Figura 4 – Regras de Inferência Fuzzy	31
Figura 5 – Sistema Rotativo	38
Figura 6 – Eixo-volante do sistema rotativo	38
Figura 7 – Variação de amplitude da vibração na frequência do eixo-volante	39
Figura 8 - Imagem das variáveis linguísticas utilizadas no sistema	40
Figura 9 – Fuzzificação das variáveis antecedentes e conseqüentes	41
Figura 10 – Regras de inferência do SE VBG no software Matlab™	41
Figura 11 – Variáveis linguísticas antecedentes e conseqüentes	42
Figura 12 – Variável antecedente Estado de Funcionamento	43
Figura 13 – Variável antecedente Sazonalidade	43
Figura 14 – Variável antecedente Custo da Manutenção.....	44
Figura 15 – Variável antecedente Manutenibilidade Humana	45
Figura 16 – Variável antecedente Missão Empresa	45
Figura 17 – Variável antecedente Perfil do Gestor.....	46
Figura 18 – Variável conseqüente DEMOI	47
Figura 19 – Parte das regras de inferência do SE DEMOI	47
Figura 20 – Simulação e resultado do Sistema Especialista DEMOI	48
Figura 21 – Verificação preliminar do tempo de retorno e a validação do resultado	50
Figura 22 – Integração entre os SE VBG e DEMOI	51
Figura 23 – Módulo para escolha do modo de execução	52
Figura 24 – Módulo para entrada de valores.....	53
Figura 25 – Módulo de Saída do Sistema proposto	54
Figura 26 – Integração entre os módulos para execução do SE VBG	55
Figura 27 – Integração entre os módulos para a execução do SE DEMOI	55
Figura 28 - A arquitetura do aplicativo proposto.....	56
Figura 29 – Diretório com as bases de conhecimento e entradas.....	56
Figura 30 – Variáveis do SE VBG e seus respectivos valores	57
Figura 31 – Execução do SE VBG no aplicativo Matlab.....	58
Figura 32 – Variáveis do SE DEMOI e seus respectivos valores	59
Figura 33 – Execução do SE DEMOI no Matlab™	60
Figura 34 – Modo de execução do sistema.....	61
Figura 35 – Configuração do gráfico de saída.....	62
Figura 36 – Entrada de valores para as variáveis dos SE VBG e DEMOI	63
Figura 37 – Resultado apresentado pelo SE proposto.....	64
Figura 38 – Variável Linguística “Relevância”	66
Figura 39 – Variável Linguística “Tempo Manutenção”	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de retorno no Matlab™ e no Aplicativo proposto	65
Tabela 2 - Comparativo dos tempos de retorno entre Matlab™ e o Aplicativo proposto	67

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
IA	Inteligência Artificial
IHM	Interface Homem-Máquina
J2SE	<i>Java 2 Platform Standard Edition</i>
NBR	Norma Brasileira
SE	Sistema Especialista
VBG	Sistema Especialista para diagnósticos e monitoramento preditivo de máquinas rotativas baseado na análise de vibração
T2-FLS	Sistema Lógica Fuzzy – Tipo 2
ATC	Adesivo de telhas cerâmicas
C#	Linguagem de programação orientada a objetos, desenvolvida pela Microsoft

LISTA DE ACRÔNIMOS

DEMOI Determinador Especialista do Momento Ótimo de Intervenção
WEB Referência à rede mundial de computadores

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 CONCEITOS DE MANUTENÇÃO	17
2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO.....	19
2.3 IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO	20
2.4 SISTEMAS ESPECIALISTAS	22
2.4.1 Estrutura dos Sistemas Especialistas	24
2.5 LÓGICA <i>FUZZY</i>	26
2.5.1 Fundamentos da Lógica <i>Fuzzy</i>	26
2.5.2 Variáveis Linguísticas	28
2.5.3 Funções de Pertinência	29
2.5.4 Regras <i>Fuzzy</i>	30
2.6 APLICAÇÕES DE SISTEMAS ESPECIALISTAS	31
2.6.1 Sistema para a avaliação da condição de isolamento de transformadores	32
2.6.2 Sistema Especialista para diagnóstico de falhas em turbinas eólicas	33
2.6.3 Sistema Especialista para a identificação de impactos ambientais	33
2.6.4 Sistema Especialista para classificação de anomalias em telhas cerâmicas	34
2.6.5 Sistema Especialista aplicada no problema da ferrugem asiática	35
3 DESENVOLVIMENTO.....	37
3.1 CASO DE ESTUDO	37
3.1.1 Sistema Especialista VBG	37
3.1.2 Sistema Especialista DEMOI	41
3.1.2.1 Variável Antecedente: Estado de Funcionamento	43
3.1.2.2 Variável antecedente: Sazonalidade.....	43
3.1.2.3 Variável antecedente: Custo da Manutenção	44
3.1.2.4 Variável antecedente: Manutenibilidade Humana.....	44
3.1.2.5 Variável antecedente: Missão da Empresa.....	45
3.1.2.6 Variável antecedente: Perfil do Gestor.....	45
3.1.2.7 Variável Consequente: DEMOI	46
3.1.2.8 Interação entre as variáveis linguísticas	47
3.2 ANÁLISES E TESTES PRELIMINARES.....	48
3.3 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PROPOSTO.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 EXECUÇÃO DOS SE VBG E DEMOI NO AMBIENTE MATLAB™	57
4.2 EXECUÇÃO DOS SE'S VBG E DEMOI NO SISTEMA PROPOSTO	60
4.3 VERIFICAÇÃO DO RESULTADO.....	64

4.4 TEMPO DE RETORNO	65
4.5 COMPARAÇÃO COM ADIÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS.....	65
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS.....	70
APÊNDICE A - Métodos para gravação dos dados de entrada	75
APÊNDICE B - Fluxograma do Sistema proposto	76
APÊNDICE C - Método para execução do SE em modo <i>online</i>.....	77

1 INTRODUÇÃO

Administradores ou gestores deparam-se cotidianamente com a necessidade de tomar decisões para a execução, conservação e personalização de atividades ou equipamentos do processo produtivo. Na manutenção, mantenedores são responsáveis por administrar e realizar atividades que visam conservar as condições de operação normal dos equipamentos, a fim de garantir a qualidade dos processos e produtos.

Dentre as atividades da manutenção estão a determinação da criticidade de máquinas, a aplicação de procedimentos adequados de intervenção e o investimento em tecnologias que favoreçam a conservação e o desempenho dos equipamentos. Para o cumprimento dessas atividades, os profissionais buscam ferramentas de planejamento e de tomada de decisão que os auxiliem em etapas decisivas e nas exigências da organização.

Quando a modalidade preditiva do setor de manutenção é priorizada, esta passa a ter um valor ainda mais estratégico para a empresa, podendo estabelecer um alto padrão de qualidade nos serviços prestados. Com o monitoramento da condição do equipamento é possível reduzir as paralisações não previstas, que representam custos mais elevados em relação às ações de uma manutenção planejada. Tão importante quanto o monitoramento constante do estado de funcionamento de um equipamento é o planejamento das ações subsequentes a um diagnóstico de anormalidade de funcionamento. Entre estas ações subsequentes e necessárias se encontra a determinação do momento oportuno da intervenção de manutenção, de tal forma que esta leve em consideração o cenário atual da produção.

Baseado nesta realidade, a utilização de Sistemas Especialistas (SE) surge como ferramenta relevante para o planejamento e controle da manutenção e da produção, fornecendo informações que auxiliam na tomada de decisão e na definição do momento oportuno para intervir num determinado equipamento ou processo produtivo, reduzindo custos de manutenção e desperdício de produtos.

Alguns trabalhos envolvendo Sistemas Especialistas focados às funções produção e manutenção foram desenvolvidos. O sistema DEMOI (Determinador Especialista do Momento Ótimo de Intervenção), apresentado por Marçal (2006), é um deles. Apesar da sua eficácia nas tarefas encomendadas, algumas limitações

ficaram expostas neste sistema, tais como o tempo de resposta devido ao número de interações entre as variáveis consideradas e processadas no ambiente MatLab™, podendo comprometer a eficiência do planejamento em algumas situações. As aplicações de sistemas como o VBG (Sistema Especialista para diagnósticos e monitoramento preditivo de máquinas rotativas baseado na análise de vibração – Marçal, 2000) e o próprio DEMOI (Determinador Especialista do Momento Ótimo de Intervenção – Marçal 2006) apresentam desenvolvimento limitado através do aplicativo *Fuzzy Logic ToolBox* do ambiente MatLab™.

Embora este software comercial seja bastante utilizado no meio acadêmico, a aplicação desenvolvida fica dependente do ambiente, tendo como outra limitação o fato de que os sistemas VBG e DEMOI são executados individualmente, sem a existência de uma vinculação ou comunicação direta entre os dois sistemas.

Assim, a proposta deste trabalho visa contribuir na melhoria do rendimento e na integração de tais Sistemas Especialistas, aplicados às funções manutenção e produção.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um aplicativo computacional para a integração e melhoria do rendimento dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI utilizados para o planejamento e controle da manutenção.

Objetivos específicos

Constituem os objetivos específicos desta proposta os seguintes:

- Criar um aplicativo implementado nas linguagens de programação JAVA e C, para a integração direta entre os Sistemas Especialistas VBG e DEMOI desenvolvidos por Marçal (2006), de forma a possibilitar a comunicação automática entre variáveis de

monitoramento, diagnóstico e tempos ótimos de intervenção de equipamentos;

- Testar o resultado dos SE's VBG e DEMOI executados no Aplicativo proposto e no ambiente MatLab™, a fim de validar o seu resultado.
- Diminuir o tempo de retorno ou resposta obtido pelo SE DEMOI elaborado no MatLab™, desenvolvido no trabalho apresentado por Marçal (2006);
- Comparar o rendimento do tempo de resposta do Sistema proposto em relação aos Sistemas Especialistas VGB e DEMOI executados no software Matlab™, acrescentando novas variáveis relacionadas com a gestão de manutenção.

Justificativa

A manutenção é uma função essencial dentro do processo de produção. Ela é responsável por conservar os equipamentos e garantir que eles tenham o desempenho desejado. Dessa maneira, com a complexidade de muitos processos produtivos, são necessárias ferramentas que auxiliem gestores no planejamento e na tomada de decisão, a fim de proporcionar melhores resultados para a empresa.

Nesse cenário, o Sistema Especialista baseado em Lógica *Fuzzy* surge como uma alternativa capaz de integrar variáveis e regras determinantes para tal planejamento e tomada de decisão. Esta conjectura envolve um elevado número de interações entre subsistemas, indicando a necessidade em um curto tempo de retorno ou análise do momento oportuno para uma intervenção na função produção ou manutenção. Alguns processos produtivos exigem ações imediatas de intervenção quando detectadas anormalidades com a intenção de se evitar paradas demoradas da linha de produção ou desperdício de produtos.

Alguns Sistemas Especialistas utilizando Lógica *Fuzzy* têm sido desenvolvidos dentro de plataformas comerciais, tais como o Matlab™. Embora útil, a implantação de Sistemas Especialistas fora de *softwares* ou pacotes comerciais sugere que a rapidez da análise computacional pode ser melhorada, permitindo ainda a adição de situações mais complexas e personalizadas para serem resolvidas na área de manutenção.

Diante do modelo proposto por Marçal (2006), algumas ações de melhoria se fazem necessárias visando um Sistema Especialista mais ágil para a aplicação e suporte no meio produtivo. Esse modelo utiliza o *toolbox Fuzzy* do aplicativo matemático Matlab™, que é um programa frequentemente utilizado no meio acadêmico. Devido à sua característica de funcionamento interpretativa, ocasiona-se uma demora no retorno de respostas durante as ações de processamento. Por exemplo, no modelo testado, composto por 648 regras de interação, o processamento necessário para a obtenção da resposta consome um tempo de aproximadamente 75 segundos, embora este tempo varie de acordo com o equipamento utilizado na simulação (MARÇAL, 2006).

O desenvolvimento de um sistema em uma linguagem de programação independente do ambiente Matlab™ visa superar esses problemas. Em particular, por meio do desenvolvimento de uma ferramenta dedicada, espera-se que o tempo de retorno seja reduzido consideravelmente e que seja promovida a integração entre Sistemas Especialistas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do Capítulo 1, no qual são abordados aspectos introdutórios do tema da pesquisa e da sua importância, os objetivos e a justificativa, outros assuntos que constituem este trabalho de Dissertação são descritos a seguir.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica: neste capítulo destacam-se os assuntos relacionados à importância do planejamento no processo produtivo; conceitos de manutenção e aspectos relacionados ao seu planejamento e controle; conceitos e características de Sistemas Especialistas; e conceitos da Lógica *Fuzzy* e da Inteligência Artificial.

Capítulo 3: Desenvolvimento. Neste capítulo apresenta-se o caso de estudo dos SE's VBG e DEMOI, bem como as análises, testes preliminares e as etapas realizadas para o desenvolvimento do aplicativo proposto desta pesquisa.

Capítulo 4: Resultados e discussão. Neste capítulo apresentam-se os resultados referentes à execução dos SE's VBG e DEMOI no aplicativo proposto e no ambiente Matlab™, visando a verificação de concordância entre as respostas obtidas por eles. Adicionalmente, mostra o comparativo dos resultados obtidos pelos

aplicativos em relação ao tempo de retorno na resposta e o desempenho destes com o acréscimo de novas variáveis.

Capítulo 5: Conclusões e propostas para trabalhos futuros. Este capítulo mostra as conclusões obtidas do desenvolvimento deste trabalho e apresenta propostas a serem realizadas em pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se os assuntos relacionados aos conceitos e tipos de manutenção, à importância do planejamento e controle da manutenção no processo produtivo, e às características e estruturas dos Sistemas Especialistas e da Lógica *Fuzzy* como uma ferramenta de Inteligência Artificial aplicada à manutenção.

2.1 CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

De uma maneira ampla, a manutenção corresponde ao conjunto de medidas e ações necessárias para a conservação ou permanência de algum item ou de uma situação. Na indústria, ela envolve os cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas. Para a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 5426 (1994), a manutenção constitui a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, visando manter ou trocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função desejada. Do ponto de vista de Kardec *et al* (2002), manutenção é o conjunto das ações destinadas a manter ou recolocar um componente, equipamento ou sistemas em um estado no qual suas funções podem ser cumpridas.

Segundo Pinto *et al* (2002), a manutenção precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização, tornando-se um fator estratégico e de diferencial. Desta forma, a manutenção não está limitada ao simples conserto da máquina, e sim aberta para funções mais amplas de gestão, garantindo disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos ou serviços e contribuindo com a redução de custos de processos e do próprio programa de manutenção na organização. Essa gestão da manutenção não abrange somente o gerenciamento do setor de manutenção, mas uma interligação e afinidade com todo o processo produtivo em questão.

À medida que os equipamentos de uma planta industrial são utilizados em um período de tempo determinado, as suas peças começam a apresentar desgastes naturais. Estes desgastes podem ser pequenos, onde a produção não fica comprometida, ou podem ser de grande proporção, onde haverá altas chances de

quebra ou parada repentina daquela peça ou maquinário, impedindo o seu funcionamento.

O tipo de manutenção a ser adotado por uma organização depende de vários fatores, entre eles a sazonalidade da produção, os efeitos na segurança ou suas consequências no meio ambiente, e a importância dos equipamentos para o processo produtivo. Assim, para cada tipo de equipamento ou item é realizado um tipo de manutenção, o qual é determinado pelos gestores do programa de planejamento da manutenção da empresa.

Como descrito anteriormente, o bom estado dos equipamentos e a sua alta confiabilidade operacional é essencial para a obtenção de um produto com qualidade e de baixo custo. Dessa maneira, para alcançar esse objetivo, podem ser aplicados diferentes tipos de manutenção. De acordo com Pinto e Xavier (2001), a manutenção pode ser classificada, em termos gerais, em três tipos: corretiva, preventiva e preditiva.

Manutenção corretiva é a atuação visando a correção da falha ou a melhoria do desempenho esperado do equipamento. Segundo Viana (2002), a manutenção corretiva é a intervenção necessária como ato contínuo para evitar graves consequências aos instrumentos de produção, buscando também propiciar segurança ao trabalhador e a conservação do meio ambiente. Esta é realizada com a conformação de uma intervenção aleatória, sem definições previstas ou planejadas, procurando minimizar o dano já ocorrido.

Segundo Pinto e Xavier (2001), a manutenção corretiva pode ser dividida em duas categorias:

- **Manutenção Corretiva Não Planejada** – este tipo refere-se à correção da falha de maneira aleatória, ou seja, corresponde à correção da falha ou do desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois causa perdas de produção e a extensão dos danos aos equipamentos é maior. Na existência exclusiva da manutenção corretiva, a manutenção é executada quando algo anormal acontece no equipamento.

- Manutenção Corretiva Planejada – é a correção que se faz em função de um acompanhamento da máquina, ou ainda pela decisão gerencial de se operar até a falha.

A manutenção preventiva é a atuação realizada para reduzir, evitar falhas ou a queda no desempenho do equipamento, considerando um planejamento previamente estabelecido baseado em intervalos de tempo definidos (PINTO e XAVIER, 1998). Segundo Pinto e Xavier (2001), para uma boa manutenção preventiva deve-se atentar na determinação dos intervalos de tempo para as intervenções no equipamento. Este tipo de manutenção restaura a condição do equipamento, a fim de evitar falhas catastróficas que causariam paralisação mais prolongada (SWANSON, 2003). Segundo Viana (2002), a manutenção preventiva, quando implantada por um planejamento efetivo, gera economia para a entidade e rápido retorno dos investimentos.

Finalmente, a manutenção preditiva corresponde a um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção. Segundo a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5462 (1994), manutenção preditiva é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejado, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO

Planejamento e Controle da Manutenção estão difundidos como uma ferramenta fundamental no processo de tomada de decisão, tanto na produção como nos negócios, visto que somente a manutenção garante a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos (VIANA, 2002).

Como a necessidade de previsibilidade e disponibilidade das máquinas do processo produtivo aumenta, o planejamento e a programação de tarefas de

manutenção se tornam mais importantes por meio de uma utilização mais frequente de manutenção preventiva e preditiva (PINTELON *et al.*, 2006).

O gerenciamento da redução dos custos visando maiores lucros, diferenciação do produto ou serviço como uma vantagem competitiva e liderança no mercado gera uma nova necessidade. Esta necessidade é a de que todas as áreas e atividades que compõem o setor produtivo precisam estar sintonizadas e adequadas à maximização da receita empresarial, considerando os aspectos da produção, os critérios da padronização, a qualidade, o baixo custo e a competitividade (SOUZA, 2008).

Nesse ponto, tratando do setor de engenharia da manutenção, não basta que os gestores e colaboradores foquem seus objetivos em aumentar a disponibilidade dos equipamentos produtivos, na redução do custo das intervenções e na confiabilidade do sistema. Ao paradigma de que a engenharia da manutenção deve elevar a disponibilidade e os demais objetivos, deve ser acrescentado que a engenharia de manutenção requer trabalhar com o propósito de elevar as receitas da organização, preservando o funcionamento do sistema produtivo (SOUZA, 2008).

Para ser competitiva, a indústria necessita extrair o máximo de retorno de seus equipamentos e processos, tanto industriais como administrativos. Tendo a manutenção como um fator estratégico dentro da empresa, cria-se a necessidade de empregar tecnologias que auxiliem no Planejamento e Controle das atividades de manutenção. Com o uso de modernas tecnologias, pode-se evidenciar uma melhora em todo o planejamento e nas tomadas de decisão do processo industrial, visando a permanência da empresa no mercado.

2.3 IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO

As empresas da indústria de processo trabalham com elevados investimentos, tendo em alguns casos, elevadas despesas direcionadas à garantia da disponibilidade e confiabilidade das máquinas. Isto exerce pressão sobre a função de manutenção e provoca a necessidade de implementação de tecnologias e práticas de preservação avançadas (VELDMAN *et al.*, 2011). Assim, melhorar a

confiabilidade e a disponibilidade de um sistema torna-se cada vez mais importante, procurando-se reduzir o tempo de inatividade (CARLO *et al.*, 2009).

A postura de pensar e agir estrategicamente é de extrema relevância para que a manutenção seja adequadamente agregada ao processo produtivo e induza à companhia a trilhar os rumos em direção à excelência empresarial. Isso necessariamente requer que a manutenção tenha um caráter proativo, sem abrir possibilidades para imprevistos e arranjos. Em uma conjuntura que impõe a competitividade como meio de sobrevivência das organizações, é necessário apresentar flexibilidade, competência, criatividade e trabalho em equipe (PINTO e XAVIER, 2001).

De acordo com Swanson (2003), uma adequada organização da função de manutenção é fundamental para que a organização mantenha sua competitividade. Se o equipamento não estiver sendo mantido adequadamente, a planta industrial ficará em desvantagem em um mercado que exige produtos de baixo custo, alta qualidade e entrega rápida. Equipamentos que são mantidos incorretamente ou na ausência de manutenção, irão falhar com frequência e precisarão ser substituídos mais cedo (menor disponibilidade e vida útil). Além disso, equipamentos sem manutenção reduzem a probabilidade de produzir produtos de qualidade consistente.

As instalações de produção de muitas pequenas e médias empresas possuem sistemas cuja política de manutenção é uma manutenção não adequada, como manutenção corretiva ou de emergência. Bem conhecida na literatura, esta política é apropriada onde a planta industrial não é totalmente dependente da confiança e disponibilidade do equipamento e não afeta a segurança (KOTHAMASU *et al.*, 2006).

Atualmente na manutenção, devido à grande escala de aplicações de sistemas inteligentes, pessoas têm uma maior atenção na sua segurança e estabilidade, portanto, a tecnologia de diagnóstico de falhas se torna o foco da atenção da manutenção em equipamentos (WANG *et al.*, 2012).

Moya (2006) aponta que as maiores empresas têm mais possibilidades para o desenvolvimento de técnicas avançadas de manutenção, tais como a manutenção baseada em condições, ou preditiva. Com a adoção de técnicas preditivas no setor de manutenção, os gastos destinados à preservação dos equipamentos podem ser reduzidos. Isso se deve ao fato de que, com a manutenção preditiva, a intervenção

no equipamento será realizada ou planejada somente no momento oportuno, reduzindo paralelamente os custos de produção. Caso a manutenção preditiva conte com as ferramentas apropriadas que realizem o monitoramento contínuo do estado das máquinas, os alertas poderão ser gerados automaticamente, facilitando o gerenciamento do equipamento e auxiliando na gestão da produção.

As aplicações de ferramentas de manutenção preditiva proporcionam muitos benefícios para a organização, de tal forma que os esforços para manter os ativos são reduzidos, beneficiando o Planejamento de Manutenção pelo fato de diagnosticar os problemas quando eles ocorrem, melhorando o planejamento da manutenção preventiva graças ao monitoramento do desempenho da máquina (ONG e LEE, 2004).

2.4 SISTEMAS ESPECIALISTAS

Os Sistemas Especialistas (SE) são programas ou sistemas de computador, no qual o conhecimento de uma pessoa ou de um grupo de especialistas em determinada atividade é transferido a um simulador para a integração e o processamento de informações. Um SE realiza a inferência ou raciocínio por meio do conhecimento armazenado e da entrada de variáveis específicas, apresentando como resultado o caminho para uma determinada ação que auxilia o usuário no planejamento e na tomada de decisão. Esses sistemas fazem parte de um ramo da Inteligência Artificial. Em essência, verifica-se que os Sistemas Especialistas são favoráveis para a gestão da organização e podem ser aplicados em diversas áreas.

Por meio do amplo conhecimento armazenado, o rápido raciocínio e por se tratar de um programa de computação, os Sistemas Especialistas embasam gestores nas suas decisões para uma ação imediata ou antecipada, sendo a situação de emergência amenizada através do suporte e auxílio destes sistemas (MENDES,1997).

De acordo com Nascimento Jr. e Yoneyama (2000), os Sistemas Especialistas são desenvolvidos para atuarem como consultores altamente qualificados em uma determinada área do conhecimento. Sua função é fornecer diagnósticos, condutas, sugestões, auxiliar gestores na tomada de decisão, ou

informações úteis, obtidas da combinação de conhecimentos e regras armazenadas previamente.

Turban e Aronson (2001) apud Liao (2005) apontam que os Sistemas Especialistas envolvem conhecimentos de tarefas particulares transferidos de um humano para o computador. Este conhecimento é armazenado no computador e, a partir dele, o usuário faz um apelo ao sistema por um conselho específico, conforme necessário. Assim, o computador pode fazer inferências e sugerir uma ação.

Segundo Ely *et al.* (2006), com a utilização do Sistema Especialista para monitoramento e controle em equipamentos, é possível extrair informações das condições operacionais dos mesmos, através das informações e conhecimentos armazenados no sistema. Suas principais vantagens são: planejar a intervenção do equipamento em um momento oportuno, redução de custos de manutenção, melhora do desempenho e aumento da vida útil do equipamento.

Graham-Jones e Mellor (1995) estabelece que os Sistemas Especialistas permitem a modelagem de experiências, julgamentos e conhecimento intuitivo, integrando-os com conhecimento de engenharia, sendo estes dados quantitativos, como propriedades mecânicas e ferramentas algorítmicas para levantar dados, possibilitando o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico interativos.

Os Sistemas Especialistas promovem a interação e combinação de variadas formas de informação, sendo elas qualitativas e/ou quantitativas, realizando as inferências sobre todos os conhecimentos adquiridos e posteriormente retornando o resultado. Caso seja necessário, o sistema especialista deve ser capaz de detalhar a forma como o mesmo atingiu o resultado final, demonstrando eficiência, embasamento e confiança para uma melhor análise e avaliação do resultado pelo usuário (GRAHAM-JONES e MELLOR, 1995).

Outro ponto importante é que as informações e o conhecimento adquirido estão armazenados no sistema, possibilitando a qualquer momento a consulta e o auxílio do Sistema Especialista, facilitando a tomada de decisão, mesmo que o solicitante não seja uma pessoa conhecedora daquele domínio.

De acordo com Ngai e Wat (2003), os Sistemas Especialistas são bastante usados em engenharia, especialmente em sistemas de controle. As vantagens do Sistema Especialista, que é baseado nas regras e fatos adicionados por um perito, podem ser caracterizadas pela reprodução dos fatos simbolizando o conhecimento similar à linguagem utilizada por especialistas e que, por meio do conhecimento

adquirido, são criadas um conjunto de regras para a representação do conhecimento sobre um determinado domínio.

As características essenciais dos Sistemas Especialistas são a habilidade em utilizar conhecimento para realizar tarefas ou propor soluções, bem como a capacidade de trabalhar com problemas complexos, através de associações e inferências, que se assemelham a situações reais. Destaca-se também a habilidade de armazenar e processar uma grande quantidade de informação, buscando a solução de um problema ou auxiliando na tomada de decisão, conectando o pensamento e as idéias do homem de maneira não-linear, ou seja, de modo associativo (REZENDE, 2005).

Espera-se de um Sistema Especialista a capacidade de aprender, ou seja, de ter a habilidade de absorver novos conhecimentos de forma automática ou com a intervenção do homem. A manipulação do conhecimento armazenado deve ser flexível para mudanças e correções, pois o escopo é passível de alterações de acordo com as necessidades e exigências perante o Sistema Especialista, devido à execução e à busca de uma nova solução ou alteração da mesma para atender um determinado problema. Todas as alterações, quando necessárias, e a capacidade de aprender são características indispensáveis de um Sistema Especialista, com a finalidade de reproduzir e melhorar a qualidade do seu resultado.

2.4.1 Estrutura dos Sistemas Especialistas

De acordo com Nascimento Jr. e Yoneyama (2000), a arquitetura mais simples de um sistema especialista consiste dos seguintes elementos: uma interface homem-máquina (IHM) responsável pela interação do usuário com o sistema; um banco de conhecimentos, onde os fatos e regras sobre um determinado domínio estão armazenados; um banco de dados, onde as informações sobre as condições da planta a ser controlada e as medidas estão registradas; e uma máquina de inferência que é responsável por deduzir as ações a serem tomadas, em função das ligações das informações do banco de dados e do banco de conhecimentos. A Figura 1 apresenta a arquitetura de um sistema baseado em conhecimentos.

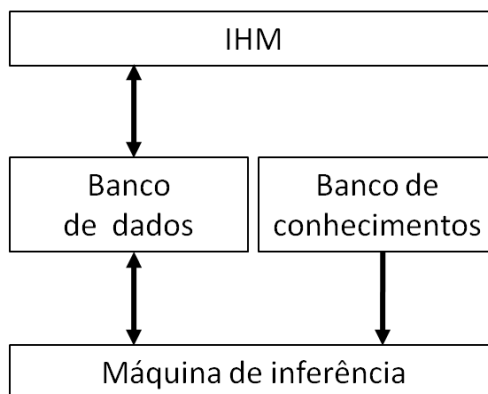


Figura 1 – Arquitetura típica de um sistema baseado em conhecimentos
Fonte: Adaptado de Nascimento Jr. e Yoneyama (2000)

O banco de conhecimento ou base de conhecimento, como definido por Rezende (2005), contém a descrição do conhecimento utilizado na resolução do problema abordado na aplicação. Na base de conhecimento são armazenados dados e informações de um determinado domínio, regras relacionadas ao domínio e, em alguns casos, heurísticas e métodos de resolução de problemas. A base de conhecimento é um conjunto de representações de ações e acontecimentos do mundo. De acordo com Barrela (2000), a base de conhecimento é um elemento residente e específico de um sistema especialista, onde estão armazenados os dados (fatos e regras), nos quais se baseiam as análises e decisões do sistema.

Franco (2003) afirma que a base de conhecimento é formada através de regras, que representam todo o conhecimento de um domínio agregado para expressar o raciocínio do especialista durante o processo de consulta ao Sistema Especialista. Esse conhecimento é transcrito para o sistema em forma de regras.

Por outro lado, o motor de inferência é responsável pelo desenvolvimento do raciocínio baseado nas informações advindas do Sistema e o conhecimento e regras armazenados na Base de Conhecimento. Assim, o motor de inferência é responsável por processar a linguagem usada para representar um saber na base de conhecimento (REZENDE, 2005).

Finalmente, a interação entre o usuário e o sistema é realizada através de uma interface (REZENDE, 2005). De acordo com Barrela (2000) a interface é o conjunto de dispositivos, métodos e filosofias responsáveis pela conexão e integração entre o homem e a máquina.

2.5 LÓGICA *FUZZY*

A Lógica *Fuzzy* e Sistemas *Fuzzy* são áreas de pesquisa da Inteligência Artificial (IA), na qual utilizam-se representações do conhecimento humano em formas computacionais (NASCIMENTO JR., 2010). Juntas, permitem o tratamento formal e matemático de informações, a modelagem, o controle e a automatização de atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que envolvam situações ambíguas e/ou desconhecidas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana. Nem todas as aplicações de IA utilizam conhecimento estruturado, porém todas necessitam pré-processar o conhecimento existente.

2.5.1 Fundamentos da Lógica *Fuzzy*

Segundo Oliveira Jr. *et al.* (2007), os conceitos fundamentais de Lógica *Fuzzy* foram criados baseados na lógica tradicional, embora modificações tenham se tornado necessárias para adaptá-los aos requisitos de aplicações em engenharia.

A teoria dos conjuntos *Fuzzy* foi concebida a partir de 1965, com os trabalhos apresentados por Lofti Zadeh. Estes trabalhos tiveram o objetivo de fornecer uma ferramenta matemática para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago (TANSCHKEIT, 2003).

Um conjunto *Fuzzy* ou nebuloso não possui um limite preciso. De acordo com Morais (2004), na lógica de primeira ordem, o conjunto de valores é “verdadeiro, falso”. Na lógica nebulosa existem valores intermediários que correspondem à maioria das condições do cotidiano. Em termos de conjuntos, nebulosidade se refere não à incerteza de um elemento pertencer a um determinado conjunto, mas a uma progressão entre pertencer e não pertencer a este conjunto.

A lógica nebulosa consiste em aproximar a decisão computacional à decisão humana. Em vez de uma saída binária (0 ou 1) ou “sim” e “não”, a saída passa a ser representada por meio de variáveis lingüísticas, do tipo “muito improvável”, “improvável”, “indefinido”, “provável”, “muito provável”, e assim por diante, facilitando a interação com o usuário e especialista (MORAIS, 2004).

Segundo Marçal (2000), a Lógica *Fuzzy* é uma ferramenta eficiente para a tradução de dados de um domínio, para uma forma possível de manipulação e processamento. A Lógica *Fuzzy* permite a captura de todo o conhecimento e a estratégia de controle de operadores humanos, especialistas no processo. Com a utilização de recursos computacionais e da lógica *Fuzzy*, é possível o tratamento e a interação de um número elevado de variáveis, de um monitoramento *on-line* do processo, um retorno em tempo real e o auxílio necessário para a tomada de decisão.

Observa-se o crescimento significativo do uso de lógica *Fuzzy* em sistemas, seja nas áreas de controle, planejamento e operação. Os principais fatores que levaram a esse crescimento são: o baixo esforço computacional envolvido, simplicidade de implementação e robustez em aplicações envolvendo informações imprecisas e vagas. Algumas características e requisitos comuns à escolha da lógica nebulosa são (CARDOSO JR., 2003):

- Disponibilidade de regras heurísticas (necessidade da ajuda de especialistas humanos);
- Inexistência de expressão em forma matemática como método de solução;
- A modelagem matemática do problema requer várias simplificações, resultando em um modelo pouco preciso;
- O problema envolve restrições vagas e/ou múltiplos objetivos conflitantes;
- A complexidade do problema torna a solução computacional bastante pesada, caso técnicas convencionais sejam utilizadas;
- Flexibilidade: as funções de pertinência utilizadas para representar determinada ocorrência podem ser alteradas dinamicamente, de acordo com a variação das condições impostas ao problema.

A utilização da Lógica *Fuzzy*, proposto no trabalho de Oh *et al.* (2012), foi útil, porque os critérios de avaliação e seus resultados são demasiadamente ambíguos para ser expressa em termos numéricos. A Inferência *Fuzzy* é uma composição de fatos e regras com base nas variáveis linguísticas que mapeiam as variáveis *Fuzzy* de entrada para a saída.

2.5.2 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *Fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta (OLIVEIRA JR. *et al.*, 2007). Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *Fuzzy*, representados por funções de pertinência.

Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero, por exemplo), de conectivos lógicos (negação “não”, conectivos “e” e “ou”), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (como parênteses) (TANSCHHEIT, 2003).

Segundo Tanscheit (2003), a principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para a caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais. Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(N, T(N), X, G, M)$, na qual:

N	Nome da variável
T(N)	Conjunto de termos de N, ou seja, o conjunto de nomes dos valores lingüísticos de N.
X	Universo de discurso
G	Regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de T(N), conectivos lógicos, modificadores e delimitadores.
M	A regra semântica M, definida pelo especialista, associa cada rótulo dos termos nos conjuntos T às funções de pertinência.

No caso específico da variável temperatura, mostrado na Figura 2, tem-se:

N: temperatura

T(N): {baixa, média, alta};

X: Intervalo de 0 a 100 da variável temperatura (Figura 2);

G: temperatura não baixa, não média e não alta;

M: associa o valor de X a um conjunto *Fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado, conforme Figura 2.

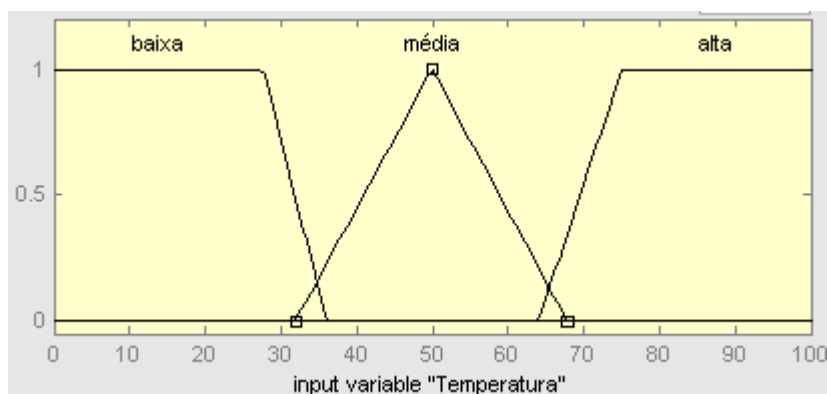


Figura 2 – Variável linguística Temperatura e seus respectivos termos
Fonte: Adaptado de Tanscheit (2003)

2.5.3 Funções de Pertinência

Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que aplica valores de pertinência *Fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *Fuzzy*. A seleção da quantidade de funções e o seu formato devem obedecer à experiência do operador humano especializado e à natureza do processo (MARÇAL, 2000).

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla em relação à lógica clássica (o elemento pertence ou não a um determinado conjunto). O conceito de que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode assumir qualquer número real no intervalo $[0, 1]$, sendo que o valor "0" indica uma completa exclusão e o valor "1" representa completa pertinência do elemento no conjunto. A Figura 3 mostra as funções de pertinência aplicadas ao conjunto de termos "Baixa", "Média" e "Alta" da variável "Altura".

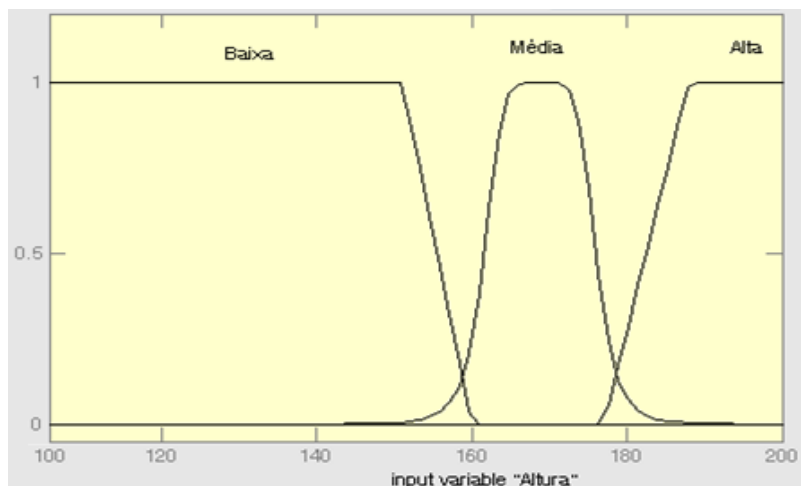


Figura 3 - Funções de pertinência empregadas a variável "Altura"
Fonte: Autoria própria

Segundo Marçal (2006), a função de pertinência pode ser representada por uma curva arbitrária, ou seja, uma função, cuja forma pode ser definida baseando-se em simplicidade, conveniência, velocidade e eficiência. Podem-se ter várias formas de função "curva de pertinência", tais como: função linear, função de distribuição gaussiana, curva sigmóide, função quadrada, curva polinomial, etc.

2.5.4 Regras Fuzzy

De acordo com Ishibuchi e Yamamoto (2005), muitos sistemas especialistas utilizam regras de produção, do tipo "SE" (condições), "ENTÃO" (ações) e o "PESO" (grau de certeza da regra), aliadas a uma máquina de inferência para realizar a sua tarefa. O peso da regra, que pode variar de 0 até 1, determina o grau de confiança específico para cada regra. As regras são parametrizadas e carregadas na Base de Conhecimento do Sistema Especialista e podem ser atualizadas, aumentadas ou excluídas de acordo com a necessidade do problema.

As habilidades e interesses dos especialistas também podem ser codificados (CARLO *et al.*, 2009). Essas regras podem ser utilizadas para transmitir à máquina a experiência heurística do operador humano. Muitas vezes, mesmo sob a ausência de um modelo matemático preciso ou de algoritmos bem definidos, o humano é capaz de atuar sobre uma determinada planta, utilizando a experiência acumulada ao longo dos tempos.

Entre as tarefas que podem ser realizadas por sistemas baseados em conhecimento estão: interpretação de dados, previsão, diagnóstico, síntese, planejamento, monitoração, correção de falhas, treinamento e controle ativo (NASCIMENTO JR. e YONEYAMA, 2000). A Figura 4 mostra a estrutura das Regras de Inferência *Fuzzy* em um exemplo que utiliza as variáveis “temperatura”, “NivelTanque” e “Resultado”. O valor mostrado entre parênteses, no final de cada regra, se refere ao peso da regra. Este valor pode ser definido por um número real do intervalo [0,1].

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. If (temperatura is alta) and (NivelTanque is baixo) then (Resultado is Problema)(1)2. If (temperatura is media) and (NivelTanque is alto) then (Resultado is Normal)(1)3. If (temperatura is baixa) and (NivelTanque is medio) then (Resultado is Normal)(1)4. If (temperatura is baixa) and (NivelTanque is baixo) then (Resultado is Alerta)(1)5. If (temperatura is alta) and (NivelTanque is alto) then (Resultado is Alerta)(1) |
|---|

Figura 4 – Regras de Inferência Fuzzy
Fonte: Autoria Própria

As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*. Este sistema só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle são consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo “SE... ENTÃO ... PESO” pode não ser uma tarefa fácil, mesmo os operadores sendo muito conhecedores do problema em questão (TANSCHKEIT, 2003).

2.6 APLICAÇÕES DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

Embora existam muitos casos reportados na literatura sobre Sistemas Especialistas, neste item são apenas abordados cinco trabalhos com aplicação em diferentes áreas de conhecimento.

2.6.1 Sistema para a avaliação da condição de isolamento de transformadores

No trabalho de Flores *et al* (2011), apresentou-se um Sistema Especialista para a avaliação da condição de isolamento de transformadores de potência com base nos sistemas de Lógica *Fuzzy*.

Por meio da aplicação do método de triângulo de Duval e na análise de gases, uma primeira avaliação da condição do transformador é obtida sob a forma de diagnóstico da análise de gás dissolvido (DGA). Numa segunda fase, um processo conhecido como mineração de dados é executado, através da realização de inquéritos cujos resultados são alimentados em um Sistema de Lógica *Fuzzy* Tipo-2 (T2-FLS), para avaliar a condição dos equipamentos atendendo os resultados da análise de gás dissolvido. A saída deste T2-FLS é dada em termos de palavras facilmente compreensíveis pelo pessoal de manutenção.

As informações utilizadas incluem a análise cromatográfica de gases dissolvidos nas propriedades do óleo e nas propriedades físicas e químicas do óleo do transformador determinado por teste.

O sistema especialista proposto pode ser visto como um tradutor, que apresenta os resultados do diagnóstico para valores linguísticos facilmente compreendidos pelo operador, a fim de conhecer a condição do equipamento. Desta forma, o pessoal da operação e da manutenção pode estabelecer a condição do isolamento do sistema óleo-papel por meio de palavras que são fáceis de entender.

Além disso, este tradutor poderia ser usado para treinamento de pessoal tendo pouca experiência em diagnósticos de transformador. O algoritmo diagnóstico tem a versatilidade para avaliar a condição do equipamento só usando um dos dois subconjuntos de dados disponíveis (gases dissolvidos no óleo e resultados do teste de óleo) ou usando dois subconjuntos. O algoritmo é também capaz de detectar se o isolamento de papel está envolvido na falha. Os conjuntos *Fuzzy* Tipo-2 e T2-FLS fornecem flexibilidade para modelagem da incerteza dos dados e do significado das palavras.

O uso de T2-FLS também permite a inclusão de outros fatores, tais como entradas de algoritmos de diagnóstico, que poderia ser uma influência de novos fatores ou uma combinação daqueles usados neste trabalho. Essa flexibilidade é muito importante para a melhoria do sistema especialista no futuro.

A utilização de pareceres de peritos em fase de desenvolvimento do sistema especialista de diagnóstico possibilita a consideração dos anos de experiência no diagnóstico de transformadores, aumentando a robustez da metodologia.

2.6.2 Sistema Especialista para diagnóstico de falhas em turbinas eólicas

Zhi-Ling *et al.* (2012) apresentaram um Sistema Especialista de diagnóstico de falhas para a caixa de velocidades em turbinas eólicas. A caixa de velocidades é um dos principais componentes de turbinas eólicas. Para fazer o diagnóstico oportuno e preciso para a caixa de velocidades, foi desenvolvido um sistema especialista de diagnóstico de falhas baseado na análise de árvore de falhas. Em primeiro lugar, é estabelecido um modelo de árvore de falhas em conformidade com as características estruturais da caixa de velocidades da turbina de vento. Baseado no modelo de árvore de falhas, a análise qualitativa e a análise quantitativa das falhas da caixa de velocidades são realizadas.

Por fim, um sistema especialista orientado a WEB é desenvolvido por meio da linguagem C# que irá poupar significativamente o tempo de diagnóstico de falhas e verificar a solução do perito para a culpa da falha da caixa de velocidades, a fim de alcançar com eficácia uma manutenção precisa e rápida.

2.6.3 Sistema Especialista para a identificação de impactos ambientais

Herrero-Jiménez (2012) apresentou um Sistema Especialista para a identificação de impactos ambientais com base em um sistema de informação geográfica. Especificamente, descreve-se a aplicação de um Sistema Especialista para o estudo de impacto ambiental da auto-estrada R-3, localizada na Comunidade de Madrid - Espanha.

O trabalho fornece uma nova maneira de identificar impactos ambientais, pois este se baseia em algoritmos de gráficos sobrepostos entre as ações e os fatores ambientais pelo uso direto de cartografia oficial em formato digital como parte do inventário ambiental.

O sistema especialista é baseado em um sistema de informação geográfica para configurar a base de dados de conhecimento, o motor de inferência e a

interface do usuário. A base de dados de conhecimento inclui declarações de conhecimento (estruturado em um banco de dados alfanumérico e espacial da informação cartográfica oficial) e conhecimento processual (através de regras heurísticas que sobrepõe ações do projeto sobre os fatores ambientais).

O *software* utilizado no teste de verificação permite o uso direto da base de dados de gráficos da Comunidade de Madrid. Com a programação realizada para o teste de verificação, é possível construir um sistema especialista completo, embora fosse necessário modificar a maneira em que parte da informação gráfica gerada pela Comunidade de Madrid é organizada.

A possibilidade aprovada neste trabalho, de ser capaz de definir as ações de acordo com o nível de detalhamento, permite que o sistema especialista seja usado para avaliação de possíveis impactos ambientais em cidades.

2.6.4 Sistema Especialista para classificação de anomalias em telhas cerâmicas

Silvestre e Brito (2012) propuseram um Sistema Especialista para inspeção e caracterização patológica em telhas cerâmicas na construção de fachadas. A telha cerâmica tem uma longa história como um revestimento de construção interior e exterior, principalmente por causa da sua versatilidade em termos de cor, dimensão e textura.

Os autores destacam que os sistemas de adesivos em telhas cerâmicas (ATC) têm avançado significativamente, devido às inovações tecnológicas implantadas nos ladrilhos de cerâmica e na indústria de materiais. Simultaneamente, a gama de aplicações onde é utilizado este revestimento tem crescido. Porém, nem todos estes desenvolvimentos foram seguidos adequadamente pelos envolvidos no processo de construção, o que levou ao aparecimento com maior frequência de fenômenos patológicos logo depois que o revestimento foi aplicado. Os adesivos em telhas cerâmicas (ATC) também são mais dependentes sobre a qualidade dos materiais, da mão de obra e da execução do que outras soluções de revestimento exterior. De acordo com os pesquisadores, estes problemas poderiam ser superados se houvesse uma inspeção detalhada e a caracterização da maioria destas situações patológicas no ATC. Estas inspeções devem incluir uma lista de medidas a serem implementadas na concepção, execução e fases de manutenção, para

evitar a ocorrência de anomalias semelhantes. Tais medidas são informações úteis e vitais para auxílio ao engenheiro.

Neste contexto, no trabalho foi proposto um sistema de inspeção de fachadas ATC, incluindo um sistema de classificação de anomalias e suas causas prováveis. Com a utilização deste sistema de classificação, a caracterização patológica de 85 fachadas ATC foram apresentadas. No total, foram verificadas 85 fachadas ATC aplicadas em 37 edifícios em Portugal. A maioria das causas prováveis de todas estas situações patológicas foram apresentadas e analisadas pelo Sistema Especialista.

A interpretação desses dados permitiu a criação de um inventário das medidas a serem implementadas na concepção, execução e manutenção das fases, a fim de evitar a ocorrência de anomalias, ajudando o engenheiro de forma prática em sua atividade diária.

2.6.5 Sistema Especialista aplicada no problema da ferrugem asiática

Este trabalho, proposto por Alves *et al.* (2011), teve como objetivo desenvolver um sistema de inferência neuro-*fuzzy* como uma metodologia para descrever a severidade de um problema agrícola denominado ferrugem asiática. Esta doença é causada pelo fungo *Phakopsora Pachyrhizi* e é uma das doenças mais agressivas para a soja. Fatores bióticos são responsáveis pelo progresso da ferrugem asiática na soja, como a interação entre o agente patogênico e o hospedeiro, assim como fatores abióticos, como umidade e temperatura. Por meio da medição destes fatores é possível avaliar o potencial da doença e determinar áreas de risco para ocorrências de epidemias.

Na pesquisa, o uso da técnica de inteligência artificial que faz uma integração entre Redes Neurais e Lógica *Fuzzy* mostra-se interessante para tratar o problema, pelo fato de que, em larga escala, diversos fatores apresentam um grau de incerteza.

O estudo concluiu que a abordagem neuro-*fuzzy* é capaz de descrever satisfatoriamente a severidade da ferrugem asiática na soja através dos fatores levantados e utilizados como entrada para o sistema. Observou-se que a gravidade é maior em temperaturas entre 20°C e 25°C, umidificação de folhas acima de 6 horas, com valores mais altos acima de 10h, e com período de 10 dias após a

inoculação do fungo. Observou-se ainda que temperaturas próximas a 15°C aumentam o período latente da doença, mas não inibem seu desenvolvimento depois de passados 10 dias.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo apresenta-se o caso de estudo dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI, bem como as análises, testes preliminares e as etapas de desenvolvimento do aplicativo proposto. Especificamente, descrevem-se as atividades relacionadas à elaboração de um aplicativo computacional para a execução integrada e melhoria de rendimento dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI voltados à função manutenção.

3.1 CASO DE ESTUDO

No desenvolvimento do aplicativo para a execução integrada de Sistemas Especialistas foram utilizados como referência os Sistemas Especialistas VBG (Sistema Especialista para diagnósticos e monitoramento preditivo de máquinas rotativas baseado na análise de vibração), apresentado por Marçal (2000), e DEMOI (Determinador Especialista do Momento Ótimo de Intervenção), apresentado por Marçal (2006). Estes sistemas especialistas são descritos a seguir.

3.1.1 Sistema Especialista VBG

Este sistema foi proposto com o intuito de fornecer um método para detectar falhas no funcionamento de máquinas rotativas baseado em alterações no padrão de vibração do sistema e no diagnóstico da condição de operação, utilizando Lógica *Fuzzy*.

A Figura 5 ilustra a montagem experimental utilizada nessa pesquisa, descrita por Marçal (2000). O sistema rotativo consiste de um motor de corrente alternada com rotação nominal de 1800 rpm e um par de polias. As polias e uma correia acionam um eixo, que mantém na extremidade oposta à da polia, um disco metálico (volante), denominado eixo-volante. Para a verificação da rotação do eixo-volante é utilizado um tacômetro mecânico MICROTEST L20 e um tacômetro óptico RS. Para a aquisição da grandeza de vibração é utilizado um acelerômetro acoplado no sistema rotativo, bem como um sistema de desenvolvimento para processamento de sinais digitais denominado Psi25.

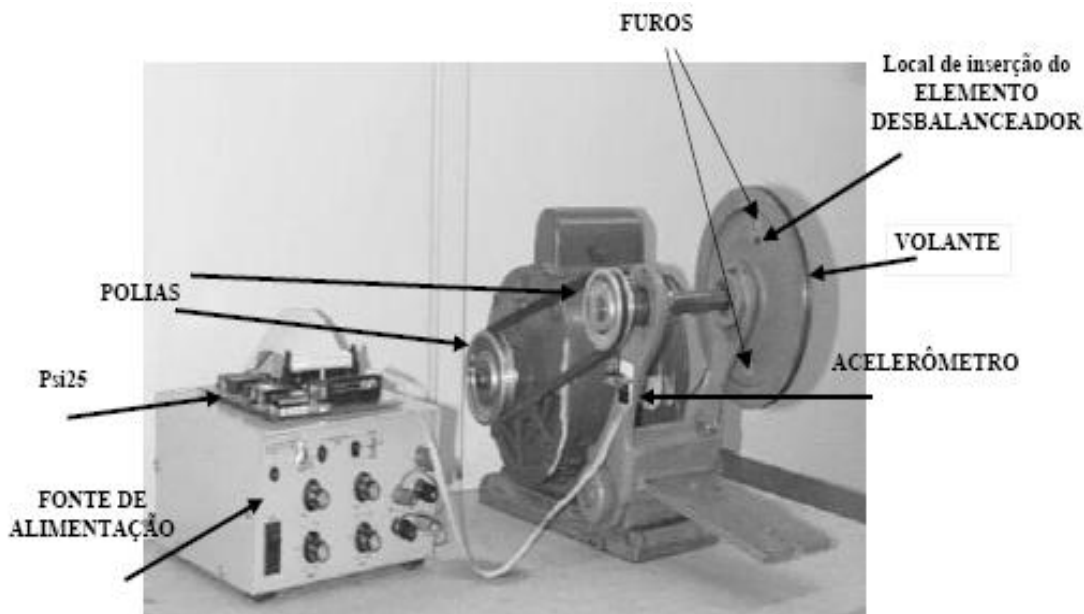


Figura 5 – Sistema Rotativo
Fonte: Marçal (2000)

O eixo-volante, ilustrado na Figura 6, possui um furo onde os elementos desbalanceadores são inseridos. Esses elementos possuem respectivamente 0,1g; 5,1g e 7,2g. Por meio da inserção desses elementos são ocasionados diferentes graus de desbalanceamento e observados diferentes níveis de vibração do sistema rotativo.

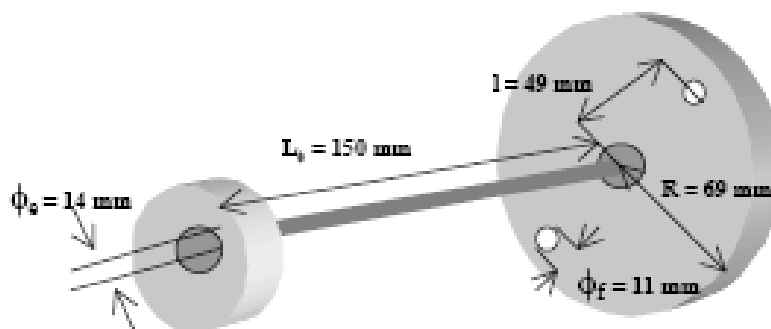


Figura 6 – Eixo-volante do sistema rotativo
Fonte: Marçal (2000)

As modificações ocorridas são analisadas, servindo como parâmetros para prever falhas incipientes, bem como a evolução destas na condição de operação, possibilitando tarefas de manutenção preditiva.

Para a diferenciação e tomada de decisão no diagnóstico do estado de funcionamento por parte do Sistema Especialista, são considerados a frequência de rotação do eixo-volante e as amplitudes de vibração inerentes a cada situação de avaria.

A Figura 7, retirada do software Matlab™, mostra as amplitudes de vibração na frequência de rotação do eixo-volante (38,5 Hz) do sistema rotativo, que representa as suas determinadas situações de condição operacional.

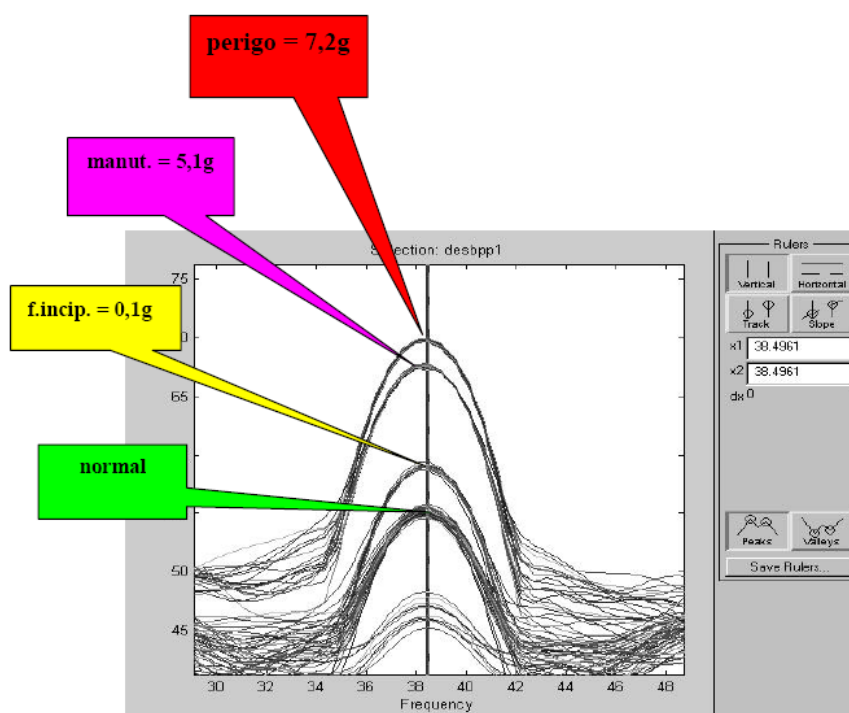


Figura 7 – Variação de amplitude da vibração na frequência do eixo-volante
Fonte: Marçal (2000)

Como se observa na figura anterior, na análise de vibração e sem o elemento desbalanceador, o estado do sistema é considerado "Normal". Por meio da utilização de elementos desbalanceadores foram verificados os estados de anormalidades do sistema rotativo. Assim, pela análise de vibração na adição de um peso de 0,1 g foi definido que o diagnóstico do equipamento corresponde a "Falha Incipiente". Na adição de um elemento com peso 5,1 g foi definido que o diagnóstico é Manutenção e na adição de um elemento com peso de 7,2 g, o diagnóstico é "Perigo".

Com a aquisição de dados de vibração do sistema rotativo é realizada a entrada no Sistema Especialista VBG, onde os dados são analisados pelo Sistema Especialista *Fuzzy* desenvolvido na ferramenta *Logic Fuzzy Toolbox* do software Matlab™.

Conforme mostrado na Figura 8, as variáveis antecedentes utilizadas no SE VBG foram “Frequência” e “Amplitude”. Como variável consequente foi utilizada a variável “Diagnóstico”.

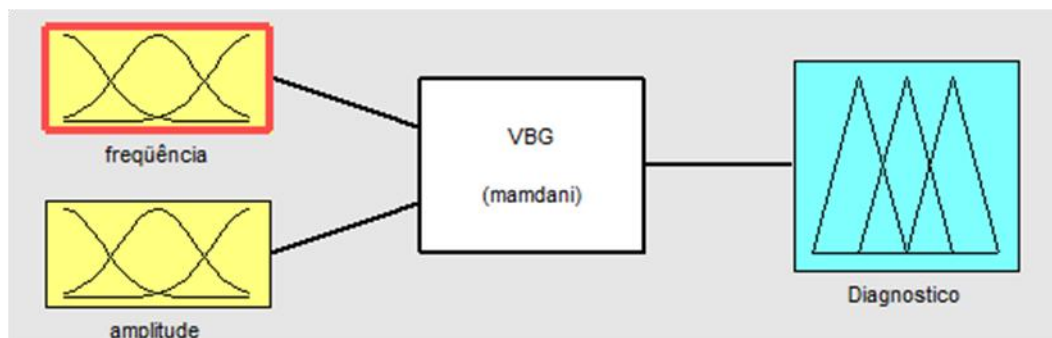


Figura 8 - Imagem das variáveis linguísticas utilizadas no sistema
Fonte: Marçal (2000)

Para cada variável têm-se o conjunto de termos descritos a seguir:

T(frequência): {fmotor, feixo-volante, 2feix-vol, 3feix-vol, 4feix-vol e 5 feix-vol};

T(amplitude): {baixíssima, baixa, normal, alta}; e

T(diagnóstico): {NORMAL, FALHA INCIPIENTE, MANUTENÇÃO, PERIGO}.

Adicionalmente, para cada termo do conjunto é atribuído uma função de pertinência, que pode ser triangular, trapezoidal, dentre outras.

A Figura 9 apresenta respectivamente a fuzzificação das variáveis “Amplitude”, “Frequência” e “Diagnóstico” deste SE. Para todas as variáveis envolvidas no SE, tanto variáveis de entrada quanto as variáveis de saída, deve-se realizar a fuzzificação.

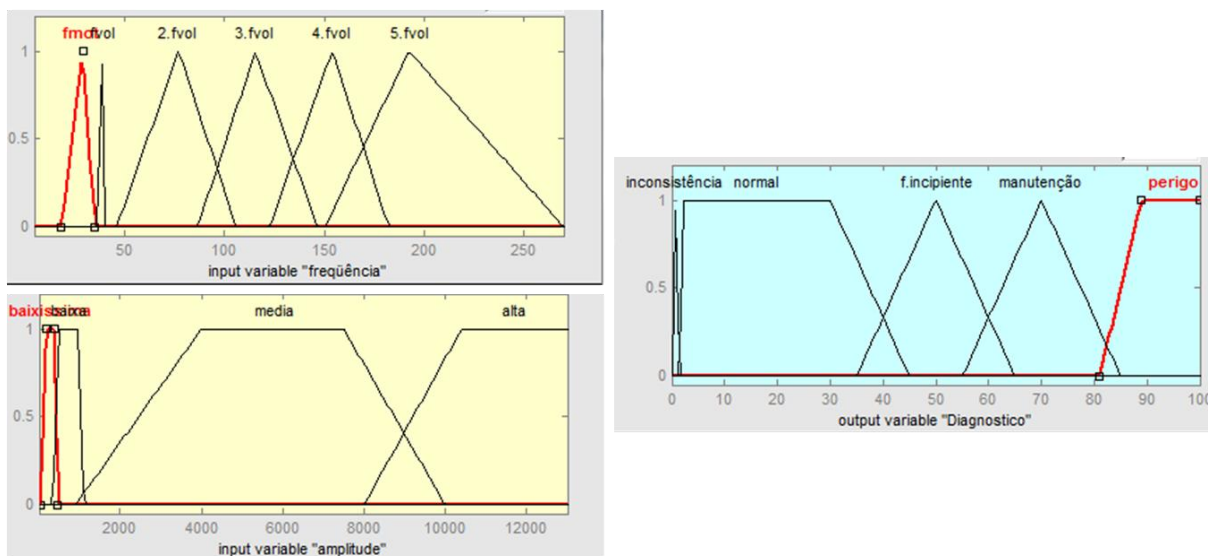


Figura 9 – Fuzzificação das variáveis antecedentes e conseqüentes
Fonte: Adaptado de Marçal (2000)

O método permite a obtenção de um diagnóstico do estado de funcionamento do sistema rotativo, baseado em uma coleção de regras lógicas, na forma de declarações SE<condição>ENTÃO<ação>PESO (MARÇAL, 2000). A Figura 10 mostra uma parte das regras de inferência definidas para este SE. O total de 24 regras foram inseridas neste Sistema Especialista.

1. If (freqüência is fvol) and (amplitude is baixissima) then (Diagnostico is normal) (1)
2. If (freqüência is fvol) and (amplitude is baixa) then (Diagnostico is f.incipiente) (1)
3. If (freqüência is fvol) and (amplitude is media) then (Diagnostico is manutenção) (1)
4. If (freqüência is fvol) and (amplitude is alta) then (Diagnostico is perigo) (1)
5. If (freqüência is fmot) and (amplitude is baixissima) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
6. If (freqüência is fmot) and (amplitude is baixa) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
7. If (freqüência is fmot) and (amplitude is media) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
8. If (freqüência is fmot) and (amplitude is alta) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
9. If (freqüência is 2.fvol) and (amplitude is baixissima) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
10. If (freqüência is 2.fvol) and (amplitude is baixa) then (Diagnostico is inconsistência) (1)
11. If (freqüência is 2.fvol) and (amplitude is media) then (Diagnostico is inconsistência) (1)

Figura 10 – Regras de inferência do SE VBG no software Matlab™
Fonte: Adaptado de Marçal (2000)

3.1.2 Sistema Especialista DEMOI

O Sistema Especialista DEMOI foi apresentado por Marçal (2006). Neste, propõe-se o uso da Lógica *Fuzzy* como ferramenta de apoio e fundamentação para

o planejamento e tomada de decisão do momento oportuno (ótimo) da intervenção de manutenção em sistemas que integram o processo de produção.

Para o planejamento e a decisão do momento oportuno de intervenção em um equipamento deve-se considerar o seu estado de funcionamento, porém, a decisão de intercessão não deve ser tomada somente pelo estado de operação. Por mais severo que seja o defeito diagnosticado, outros fatores como sazonalidade (demandas produtivas que variam de acordo com o mercado consumidor), custo de manutenção, custo de intervenção, custo de paralisação do processo produtivo por interrupção para a manutenção, disponibilidade de recursos humanos especializados próprios ou terceirizados, existência em estoque de materiais sobressalentes (manutenabilidade), a missão da empresa, o perfil do gestor da empresa e entre outros, devem pesar e serem levados em consideração.

A interação dos diversos critérios que são envolvidos para o planejamento e a decisão de intervenção, tais como: aspectos técnicos (variáveis quantitativas), aspectos de gestão e valores culturais (variáveis qualitativas), é possibilitada com o uso da Lógica *Fuzzy*. Esta é usada como a ferramenta para o embasamento do diagnóstico e decisão do momento de paralisação do sistema para ajustes (manutenção preditiva), os quais se não tratados, enquanto defeitos podem evoluir para falhas.

As variáveis antecedentes, ou seja, os fatores considerados como relevantes na proposta são: Estado_Funcionamento, Sazonalidade, Custo_Manutenção, Manutenabilidade_Humana, Missão_Empresa e Perfil_Gestor. A Figura 11 apresenta as variáveis linguísticas antecedentes e consequentes.

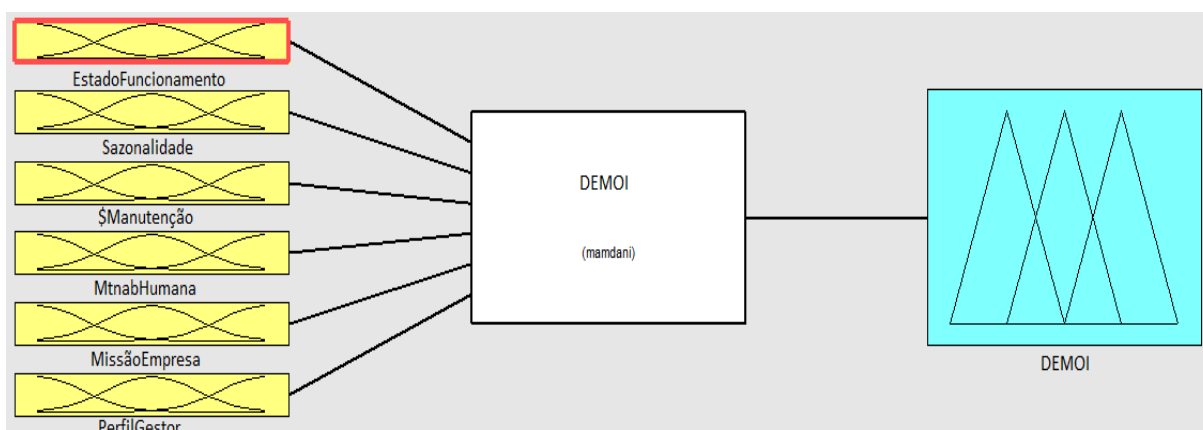


Figura 11 – Variáveis linguísticas antecedentes e consequentes
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.1 Variável Antecedente: Estado de Funcionamento

A variável Estado_Funcionamento se refere ao estado de operação de um item/equipamento considerado crítico. A criticidade de um equipamento é determinada em função da importância que o mesmo possui no processo de produção. A Figura 12 mostra a variável e as funções de pertinência (Normal, Falha Incipiente, Manutenção, Perigo) adotadas.

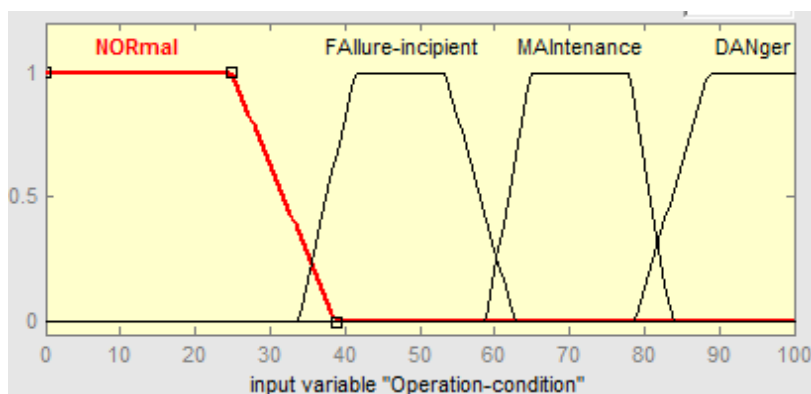


Figura 12 – Variável antecedente Estado de Funcionamento
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.2 Variável antecedente: Sazonalidade

Segundo Marçal (2006), considera-se como sazonalidade às diversas fases ou condições relacionadas com cronogramas de produção, demanda e cumprimento de prazos de entrega de um produto. A Figura 13 mostra a variável e as funções de pertinência (Baixa, Padrão, Alta) adotadas.

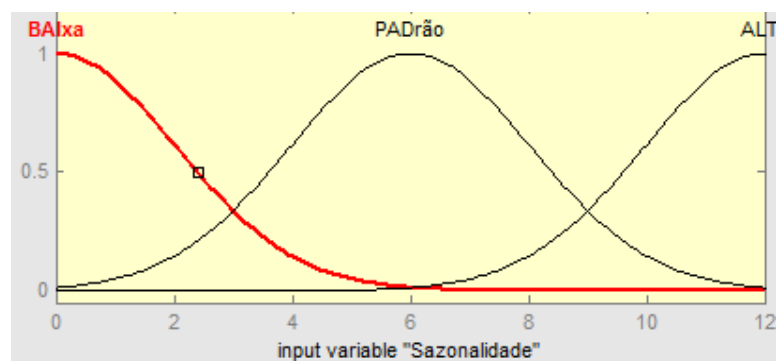


Figura 13 – Variável antecedente Sazonalidade
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.3 Variável antecedente: Custo da Manutenção

Uma manutenção previsível se enquadra como aquela cujos bens necessários e infraestrutura afim são previstas com 03 meses de antecedência. Adotam-se, para a subdivisão do critério “Custos da Manutenção”, os níveis: Barato, Previsto e Caro (VIANA, 2002). A Figura 14 apresenta a variável e suas respectivas funções de pertinência.

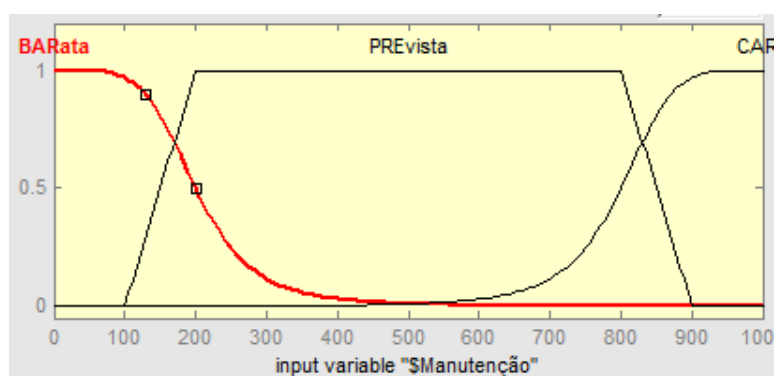


Figura 14 – Variável antecedente Custo da Manutenção
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.4 Variável antecedente: Manutenibilidade Humana

Segundo Marçal (2006), pode-se assumir e concluir que muitas responsabilidades e planos de ações compreendem o critério “Manutenibilidade”. Este conceito enfatiza a “disponibilidade humana” para atender e afiançar o funcionamento do(s) equipamento(s) e assegurar a continuidade da produção.

Para o modelo, e como critério para a decisão, adota-se uma distribuição dentro do período de 12 meses, considerando-se dentro da programação os ciclos de demanda alta, produção normal e férias dos mantenedores. Para estas suposições emprega-se, resumidamente, as variáveis linguísticas: SIM (ciclo da alta demanda), TEMPorário (ciclo de produção normal) e NÃO (ciclo de férias de integrante da equipe).

A Figura 15 traz as funções de pertinência de cada termo da variável antecedente (o critério) “Manutenibilidade Humana”.

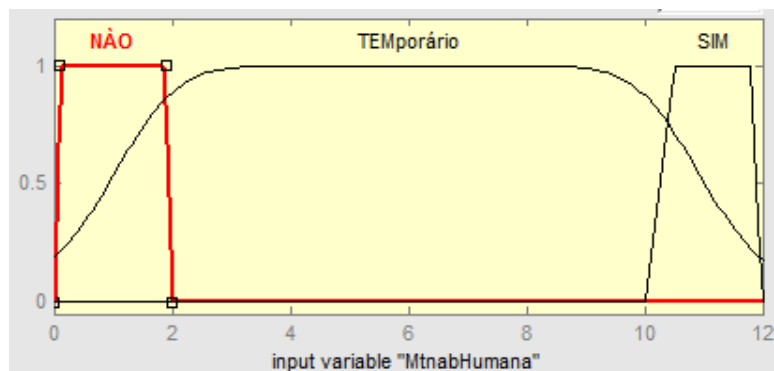


Figura 15 – Variável antecedente Manutenabilidade Humana
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.5 Variável antecedente: Missão da Empresa

De acordo com o trabalho de Marçal (2006), assume-se o critério “Missão da Empresa” dividindo-o de uma maneira simplista para o modelo em objetivos “Qualidade” (sinalizando credibilidade e confiança naquilo que produz e entrega) e “Lucro” (colocando este como objetivo acima de qualquer preocupação com a qualidade). A Figura 16 apresenta a variável “Missão da Empresa” e suas respectivas funções de pertinência.

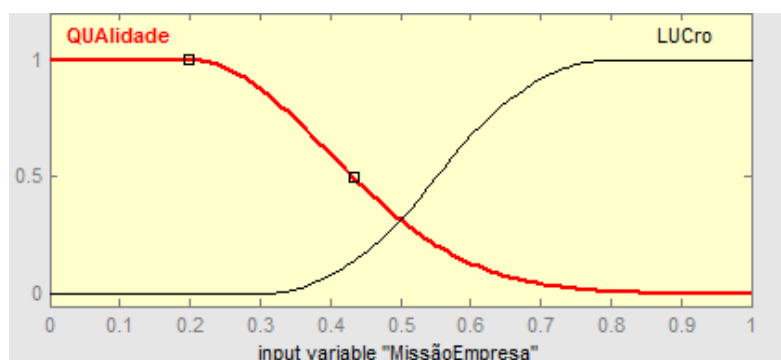


Figura 16 – Variável antecedente Missão Empresa
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.6 Variável antecedente: Perfil do Gestor

Segundo Marçal (2006), o fator que embasa a escolha da subdivisão do critério “Perfil do Gestor” está relacionando com a experiência profissional do gestor considerado. Imagina-se para a criação dos perfis:

- CONservador -> tem como característica forte atitude de prevenção e prefere arcar com gastos do que manchar a imagem e credibilidade da empresa;
- PONderado -> adota como prática e lema a análise minuciosa da situação e sempre decide de forma ponderada, isto é, por aquela que forneça mais resultados positivos e minimize perdas e consequências para a empresa e
- REVolucionário -> possuidor de um estilo mais arrojado e ousado, através do qual visa o lucro da empresa, mesmo que para isto corra-se riscos.

A Figura 17 apresenta a variável “Missão da Empresa” e suas respectivas funções de pertinência.

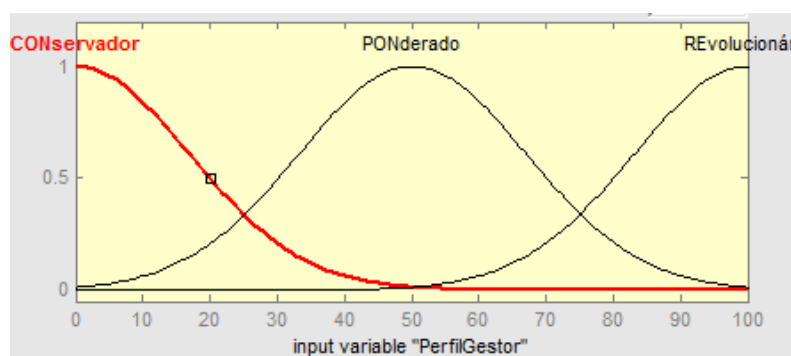


Figura 17 – Variável antecedente Perfil do Gestor
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.7 Variável Consequente: DEMOI

A variável consequente apresenta o resultado esperado das diversas combinações realizadas pelas variáveis antecedentes e seus respectivos valores de entrada. Esse resultado mostra a decisão suportada sobre o momento mais apropriado para a intervenção da manutenção no determinado item do processo. A Figura 18 mostra as possibilidades escolhidas diante da variável consequente: Emergência, Urgência, Planejamento para intervenção em horas definidas e Planejamento para intervenção no momento oportuno (MARÇAL, 2006).

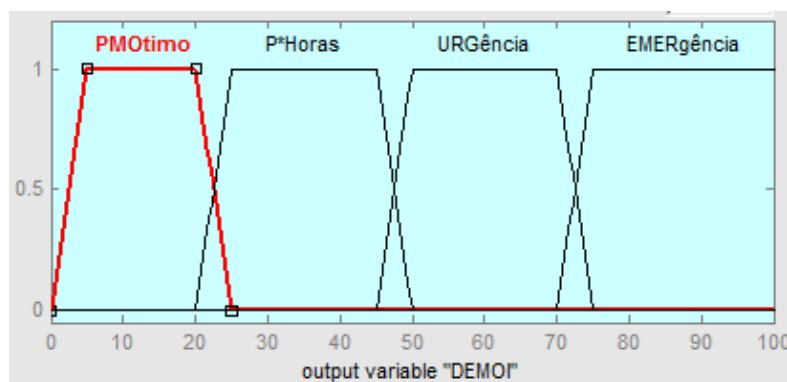


Figura 18 – Variável consequente DEMOI
Fonte: Marçal (2006)

3.1.2.8 Interação entre as variáveis linguísticas

O planejamento e a tomada de decisão do momento oportuno para a intervenção relevam grandezas quantitativas e indicadores (informações não quantitativas) (MARÇAL, 2006).

As regras decorrentes das interações (regras de inferência) totalizam 648 combinações na simulação do modelo estruturado. A Figura 19 mostra parte destas regras e a forma como estas estão estruturadas.

1. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is CONSERvador) then (DEMOI is P*Horas) (1)
2. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is PONderado) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
3. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is REvolucionário) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
4. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is LUCro) and (PerfilGestor is CONSERvador) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
5. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is LUCro) and (PerfilGestor is PONderado) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
6. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is NÀO) and (MissãoEmpresa is LUCro) and (PerfilGestor is REvolucionário) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
7. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is TEMPorário) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is CONSERvador) then (DEMOI is P*Horas) (1)
8. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is TEMPorário) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is PONderado) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
9. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is TEMPorário) and (MissãoEmpresa is QUALidade) and (PerfilGestor is REvolucionário) then (DEMOI is PMOtimo) (1)
10. If (EstadoFuncionamento is NORmal) and (Sazonalidade is BAIXa) and (\$Manutenção is BARata) and (MtnabHumana is TEMPorário) and (MissãoEmpresa is LUCro) and (PerfilGestor is CONSERvador) then (DEMOI is PMOtimo) (1)

Figura 19 – Parte das regras de inferência do SE DEMOI
Fonte: Adaptado de Marçal (2006)

Para a simulação do modelo proposto, alguns atributos considerados como critérios pertinentes e comuns dentro do ambiente de manufatura são assumidos. Desta forma, a simulação do modelo proporciona experimentos para ajustes e melhorias. O modelo se mostra apropriado e fornece mais uma ferramenta para que gestores planejem e tomem decisões, e para que as ações de manutenção sejam programadas para o momento oportuno (MARÇAL, 2006). A Figura 20 mostra um dos possíveis resultados (Momento oportuno) da variável consequente “DEMOI” por meio da simulação e execução do Sistema Especialista.

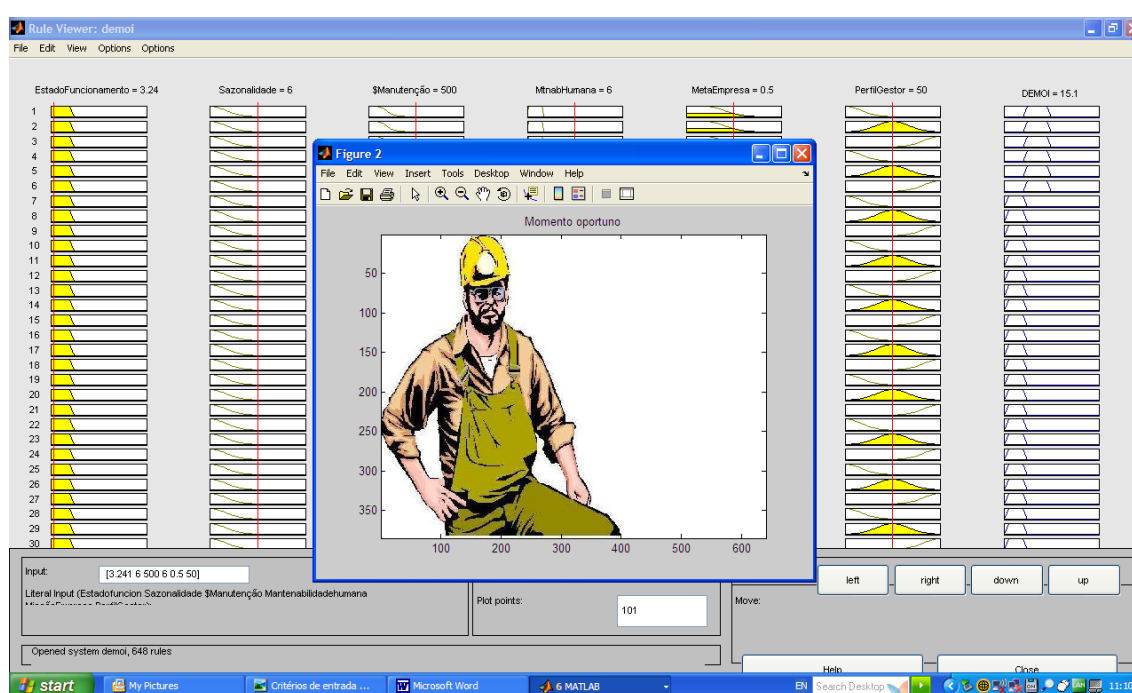


Figura 20 – Simulação e resultado do Sistema Especialista DEMOI
Fonte: Adaptado de Marçal (2006)

3.2 ANÁLISES E TESTES PRELIMINARES

Antes do desenvolvimento do sistema especialista proposto, realizou-se uma análise de potencial e alguns testes preliminares de execução dos SE's já existentes no novo sistema preliminar, em relação à execução dos SE's no ambiente Matlab. As etapas desta análise descrevem-se a seguir.

A primeira etapa correspondeu a análise do processo de criação e execução do Sistema Especialista baseado em Lógica *Fuzzy* por meio do *software* MatLab™. Nessa etapa pôde-se constatar a praticidade e a facilidade da ferramenta para a

criação e manutenção do Sistema Especialista. No entanto, notou-se que a ferramenta apresenta um tempo de retorno elevado e não há possibilidades de integração com outros Sistemas Especialistas.

A próxima etapa teve como objetivo a verificação do tempo de retorno por meio da execução do Sistema Especialista DEMOI, baseado em Lógica *Fuzzy*, em um sistema dedicado e independente do *software* Matlab™. Nesse teste foi utilizado o Motor de Inferência *Fuzzy*, implementado na linguagem de programação C, disponível no pacote MatLab™.

Para os testes de verificação do tempo de retorno, foi utilizado o Sistema Especialista DEMOI, pelo fato do mesmo apresentar um tempo de retorno elevado na sua execução no ambiente Matlab™.

O resultado dessa etapa preliminar mostrou que o tempo de retorno do aplicativo em teste foi inferior ao tempo apresentado pela execução do SE DEMOI no *software* Matlab™.

Outro ponto analisado com a execução do SE DEMOI no aplicativo em teste, consistiu na verificação da resposta apresentada pelo aplicativo proposto e que esteve em conformidade com a resposta apresentada na execução do SE DEMOI no *software* Matlab™.

A Figura 21 apresenta as telas de execução do SE DEMOI, sendo a primeira, a execução e teste inicial no aplicativo proposto e, a segunda, a execução do SE DEMOI por meio do *software* Matlab™. A linha vermelha representa a entrada realizada em cada variável e seu valor é mostrado logo acima. Nesta análise preliminar foram contempladas a verificação do tempo de retorno e a verificação dos resultados descritos nessa etapa.

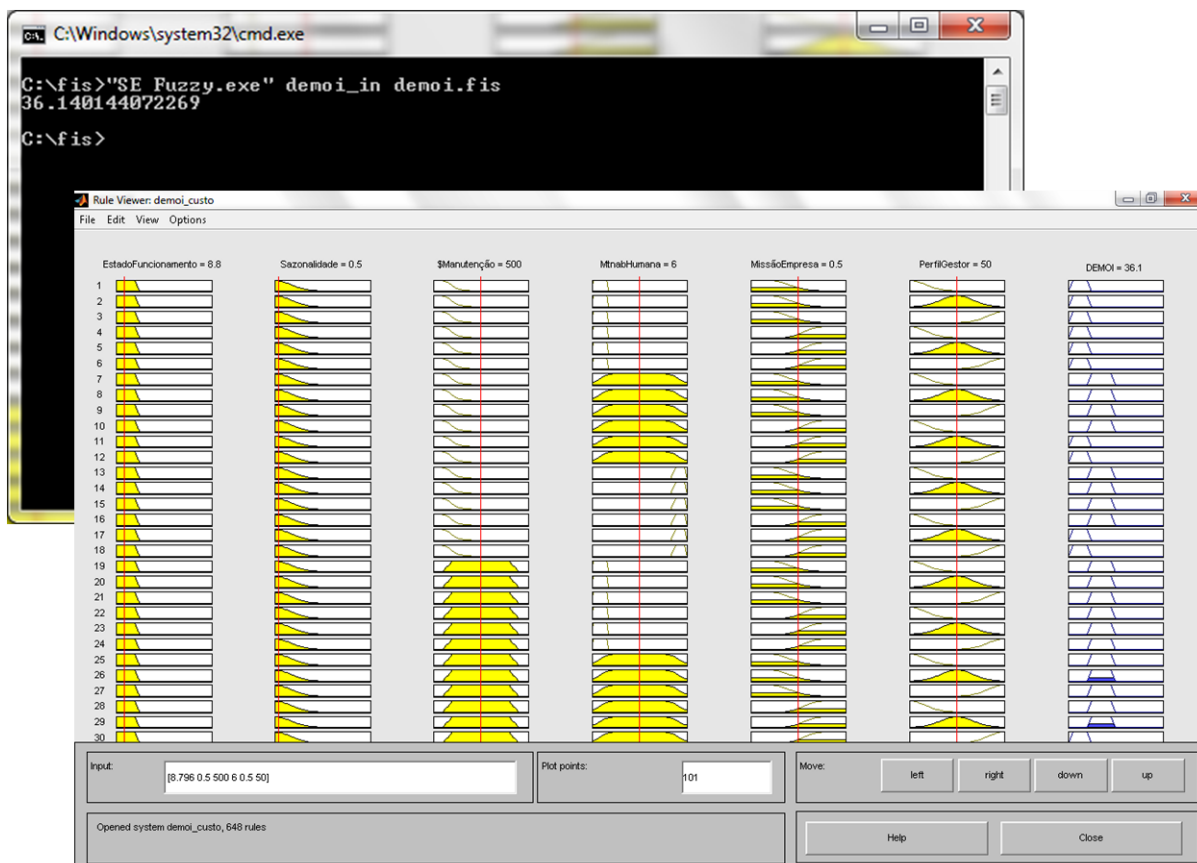


Figura 21 – Verificação preliminar do tempo de retorno e a validação do resultado
Fonte: Autoria Própria

A última etapa dessa análise preliminar é a definição do aplicativo proposto, levando em consideração os resultados das etapas anteriores e da funcionalidade requerida pela ferramenta proposta, na execução integrada dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI. O primeiro SE tem como objetivo verificar a condição de funcionamento do equipamento e, o segundo, de determinar o momento ótimo de intervenção no equipamento. A Figura 22 mostra a integração requerida entre os Sistemas Especialistas VBG e DEMOI, no qual o parâmetro de saída (Diagnóstico) do SE VBG representa uma das entradas para o SE DEMOI.

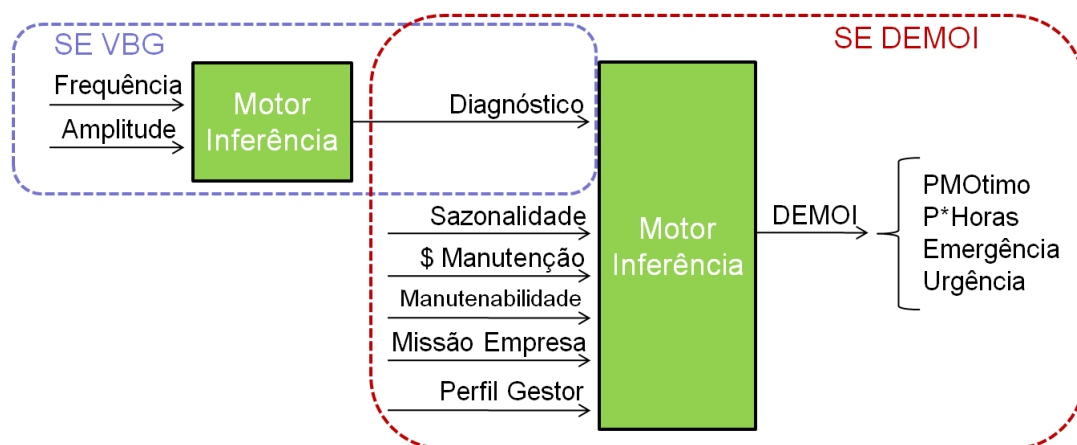


Figura 22 – Integração entre os SE VBG e DEMOI
Fonte: Autoria Própria

Nessa última etapa da análise preliminar foi verificado a possibilidade de integração entre esses dois Sistemas Especialistas por meio das linguagens de programação JAVA e C. A linguagem de programação JAVA foi utilizada pela facilidade de criação de interfaces e pela comunicação com o Motor de Inferência *Fuzzy*, implementado na linguagem de programação C.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PROPOSTO

Essa etapa teve como objetivo o desenvolvimento do Sistema proposto, contemplando os módulos para a execução integrada de Sistemas Especialistas.

Para a criação do sistema proposto foram utilizadas as linguagens de programação JAVA e C, onde as mesmas foram integradas.

As Interfaces Homem-Máquina ou os módulos de interação com o usuário foram desenvolvidas por meio da arquitetura J2SE (*Java Standard Edition*), onde o Módulo de Inferência é integrado ao Motor de Inferência *Fuzzy* que foi desenvolvido na linguagem de programação C, disponibilizado no pacote MatLab™.

Os módulos desenvolvidos para a interação do usuário são: Modo de execução, Módulo de entrada, Módulo de Inferência e o Módulo de Saída.

O módulo para escolha do modo de execução (Figura 23) permite a escolha de execução no modo *Offline* ou no modo *Online*. No modo *offline*, os valores das variáveis de entrada são inseridas manualmente e a execução e visualização do resultado final são acessadas por meio de um comando. Já no modo *Online*, o

sistema continuamente realiza a leitura dos valores de entrada que ficam armazenadas em uma base com os valores de entrada e, no final de cada execução, apresenta o resultado correspondente.

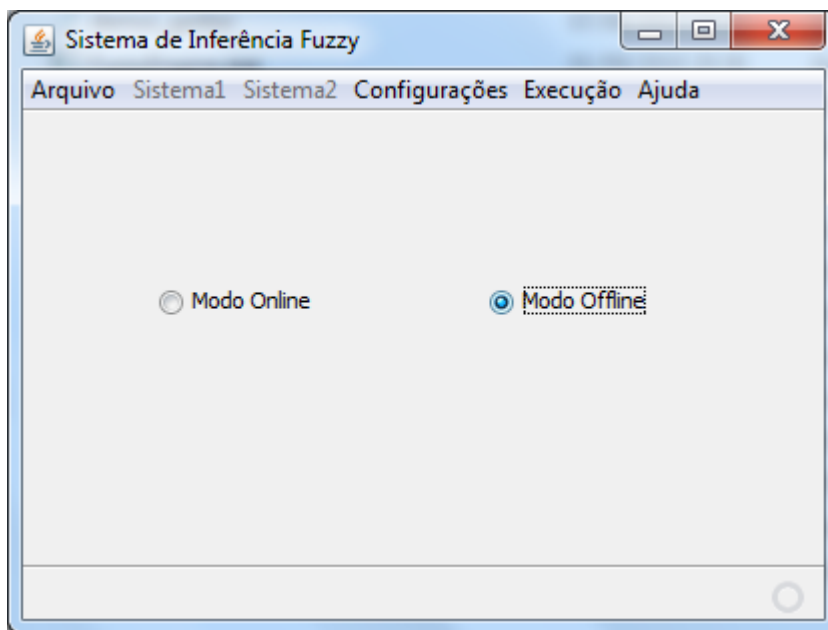


Figura 23 – Módulo para escolha do modo de execução
Fonte: Autoria Própria

Quando selecionado o modo *offline*, o módulo de entrada é responsável pela entrada manual dos valores para as respectivas variáveis antecedentes dos Sistemas Especialistas. A Figura 24 mostra a interface para as entradas desses valores nos SE's VBG e DEMOI. No Apêndice A é mostrado uma parte do código em JAVA para a gravação dos valores de entrada.

The screenshot shows a software interface for data entry. It is divided into two columns for different systems: 'Sistema: VBG 2' and 'Sistema: DEMOI'. Each column contains a table with 'Variável' (Variable) and 'Valor' (Value) columns. Below each table is a text box for the output, labeled 'Saída 1' and 'Saída 2' respectively. A central button labeled 'Executar' (Execute) is located at the bottom of the window.

Variável	Valor
freqüência	38,5
amplitude	200

Saída 1
19.779421737254

Variável	Valor
Operation-condition	19,779
Seasonality	3
Maint-Cost-effective	500
Maintainability	6
Company-goal	0,5
Manager-profile	100

Saída 2
12.514546650051

Executar

Figura 24 – Módulo para entrada de valores
Fonte: Autoria Própria

O Módulo de Inferência é responsável por executar o Motor de Inferência *Fuzzy*, passando para ele os valores de entrada e as bases de conhecimento dos respectivos Sistemas Especialistas. Por meio dessa execução híbrida são gerados os valores para as variáveis de saída dos SE's VBG e DEMOI.

A execução completa desse módulo é realizada em etapas. Primeiro é gerada a saída do SE VBG. Esse valor de saída do SE VBG, é inserido como valor de entrada para o SE DEMOI em sua respectiva variável antecedente. Com todos os valores de entrada das variáveis antecedentes do SE DEMOI definidos é realizada a execução do SE DEMOI. Após o resultado obtido dessa execução, o valor de saída é transmitido para o Módulo de Saída e realizada a exibição do resultado final para o usuário.

O Módulo de Saída é responsável por mostrar o resultado apresentado da variável de saída do SE DEMOI na execução integrada dos SE's VBG e DEMOI. Este módulo mostra o resultado de uma forma fácil para de ser visualizada pelo usuário, conforme mostrado na Figura 25.

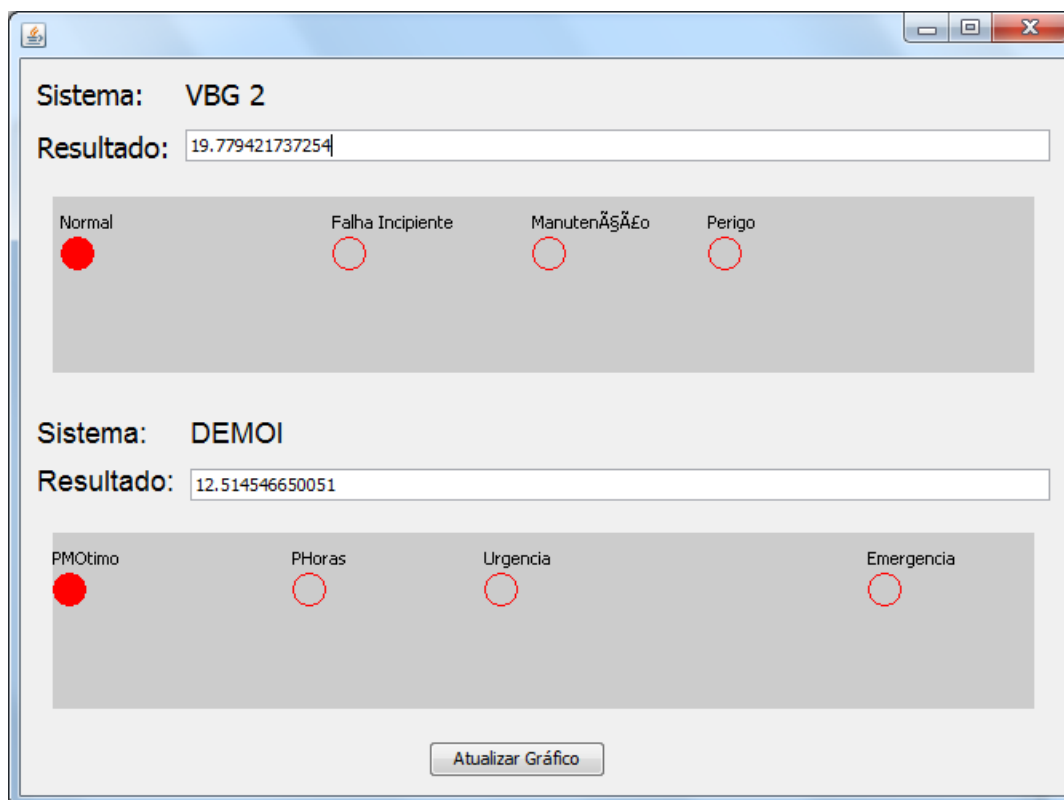


Figura 25 – Módulo de Saída do Sistema proposto
Fonte: Autoria Própria

Para promover a integração dos SE's VBG e DEMOI no sistema proposto, a execução é realizada em três fases.

- A primeira fase objetiva a execução e a obtenção do resultado do SE VBG perante a base de conhecimento e as entradas realizadas no sistema por meio do Módulo de entrada. A Figura 26 mostra a integração entre os módulos do aplicativo proposto para a execução e a obtenção do resultado do SE VBG.
- A segunda fase objetiva a execução e a obtenção do resultado do SE DEMOI por meio do resultado da primeira etapa (como uma variável de entrada), da base de conhecimento e das outras variáveis do SE DEMOI. A Figura 27 mostra a integração entre os módulos de entrada, inferência e saída na execução do SE DEMOI no aplicativo proposto.
- A terceira fase objetiva mostrar o resultado final da execução dos SE VBG e DEMOI no aplicativo proposto por meio do Módulo de Saída.

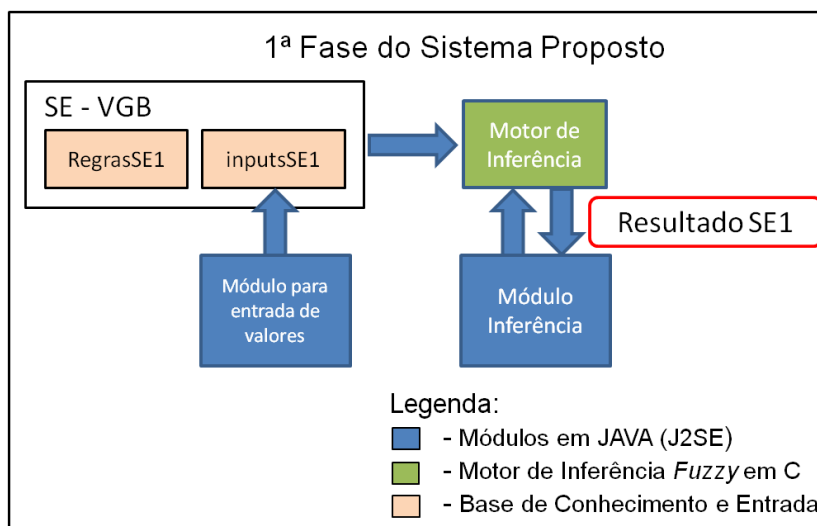


Figura 26 – Integração entre os módulos para execução do SE VBG
Fonte: Autoria Própria

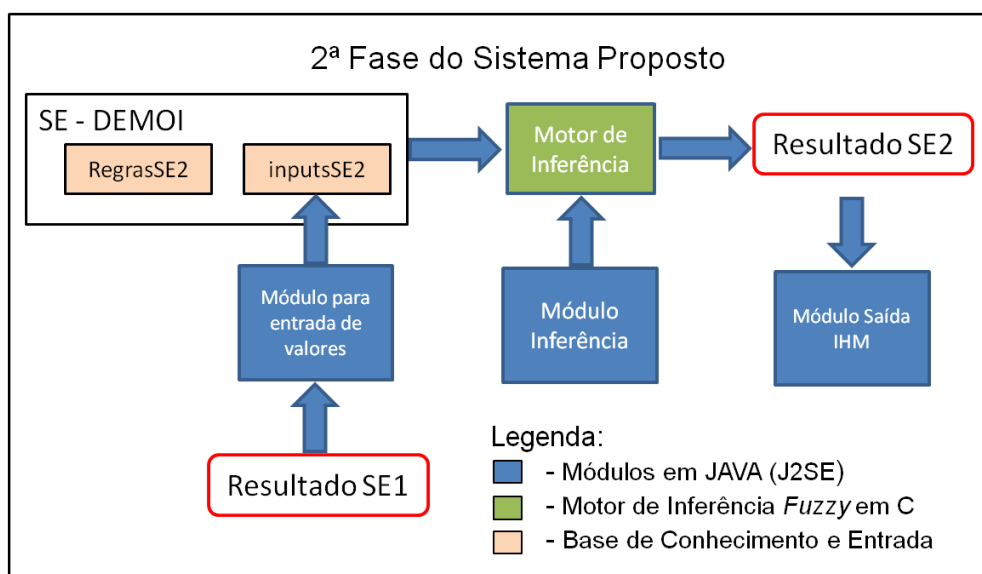


Figura 27 – Integração entre os módulos para a execução do SE DEMOI
Fonte: Autoria Própria

A arquitetura do aplicativo proposto é mostrada na Figura 28. Nos módulos em JAVA encontram-se os Módulos de Entrada, Inferência e de Saída. No módulo escrito em C encontra-se o Motor de Inferência *Fuzzy*, que é a metodologia de raciocínio empregada para o cálculo, responsável por realizar o cruzamento das informações da base de conhecimento e os dados de entrada. No Apêndice B é mostrado um fluxograma do sistema proposto.

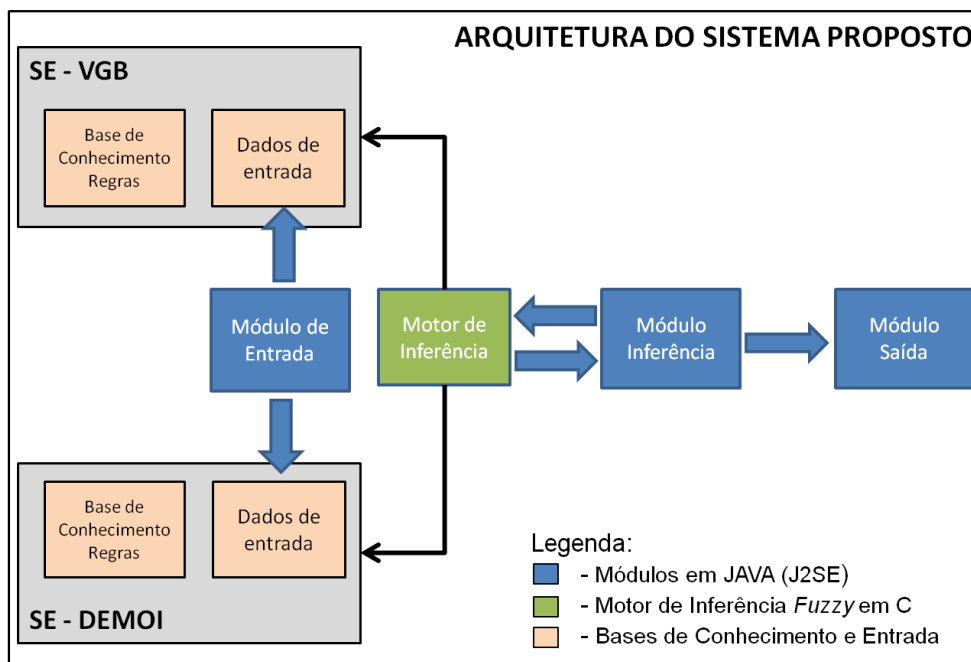


Figura 28 - A arquitetura do aplicativo proposto
Fonte: Autoria Própria

A criação e gerenciamento das bases de conhecimento são realizados pela ferramenta *Logic Fuzzy Toolbox* do software Matlab™, onde posteriormente essas bases são exportadas para um diretório ou pasta (Figura 29) do aplicativo proposto. Os arquivos do SE VBG são: “RegrasSE1.fis” que representa a base de conhecimento; e o arquivo “inputsSE1” que contém os valores de entrada para o SE VBG. Já a base de conhecimento do SE DEMOI é o arquivo “RegrasSE2.fis”. Por outro lado, o arquivo com os valores de entrada é denominado “inputsSE2”.

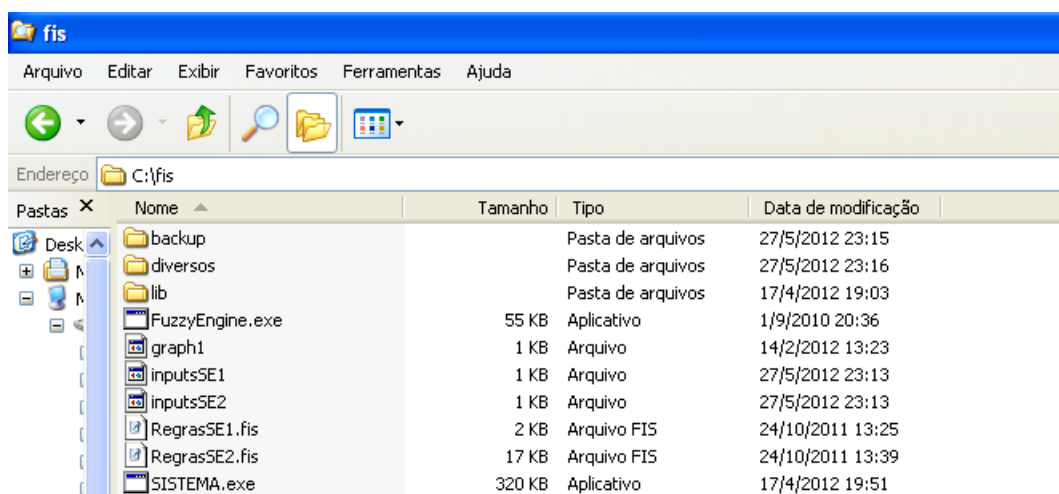


Figura 29 – Diretório com as bases de conhecimento e entradas
Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se a execução dos SE's VBG e DEMOI no aplicativo proposto e no ambiente Matlab™, visando a verificação do resultado, o tempo de retorno e as comparações do tempo de retorno com o acréscimo de novas variáveis.

4.1 EXECUÇÃO DOS SE VBG E DEMOI NO AMBIENTE MATLAB™

A execução dos SE's VBG e DEMOI no ambiente Matlab™ foi realizada pela ferramenta *Logic Fuzzy Toolbox*.

O primeiro SE que foi executado é o VBG, onde o resultado determina a situação do equipamento com base nas freqüências e amplitudes geradas pela grandeza “vibração”.

Conforme mostra na Figura 30, foram utilizados os respectivos valores (sinalizados com uma seta) para cada variável de entrada. Freqüência: **FVol Eixo-volante (valor 39,2)** e Amplitude: **Baixa (valor 778)**, obtendo como resposta o diagnóstico do equipamento como **Falha Incipiente (valor 50)**.

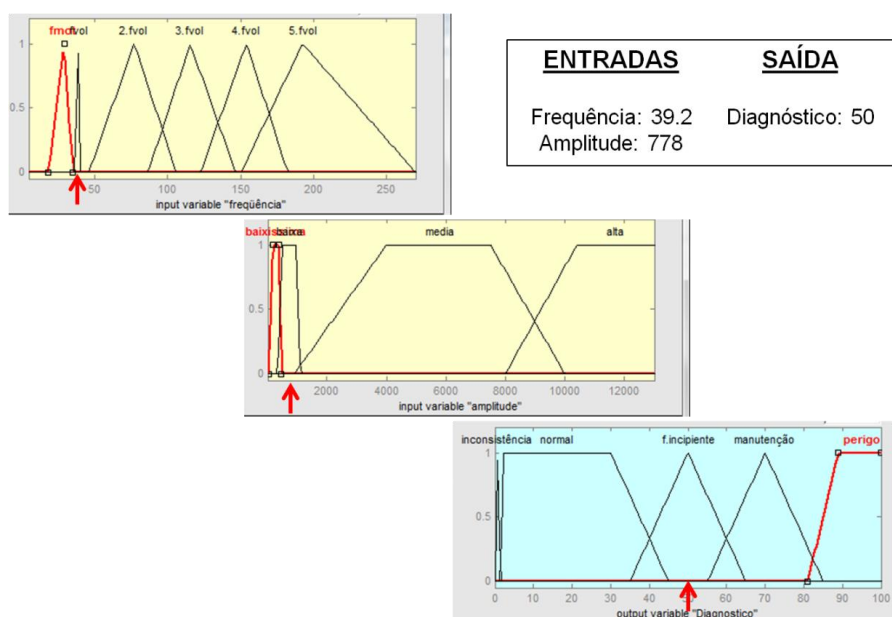


Figura 30 – Variáveis do SE VBG e seus respectivos valores
Fonte: Autoria Própria

Na simulação do SE VBG executada no ambiente Matlab™ (Figura 31) as variáveis de entrada foram alimentadas conforme os valores descritos na Figura 30. A linha vermelha determina o valor de entrada para a variável correspondente. Quando este valor de entrada pertence ao conjunto, o mesmo é preenchido de amarelo. Esses valores de entrada têm como referência as funções de pertinência adotadas em cada variável linguística, conforme mostrado na imagem anterior. Quando alterada a posição da linha vermelha das variáveis de entrada, é realizada a inferência novamente, e um novo valor ou resultado é apresentado no sistema.

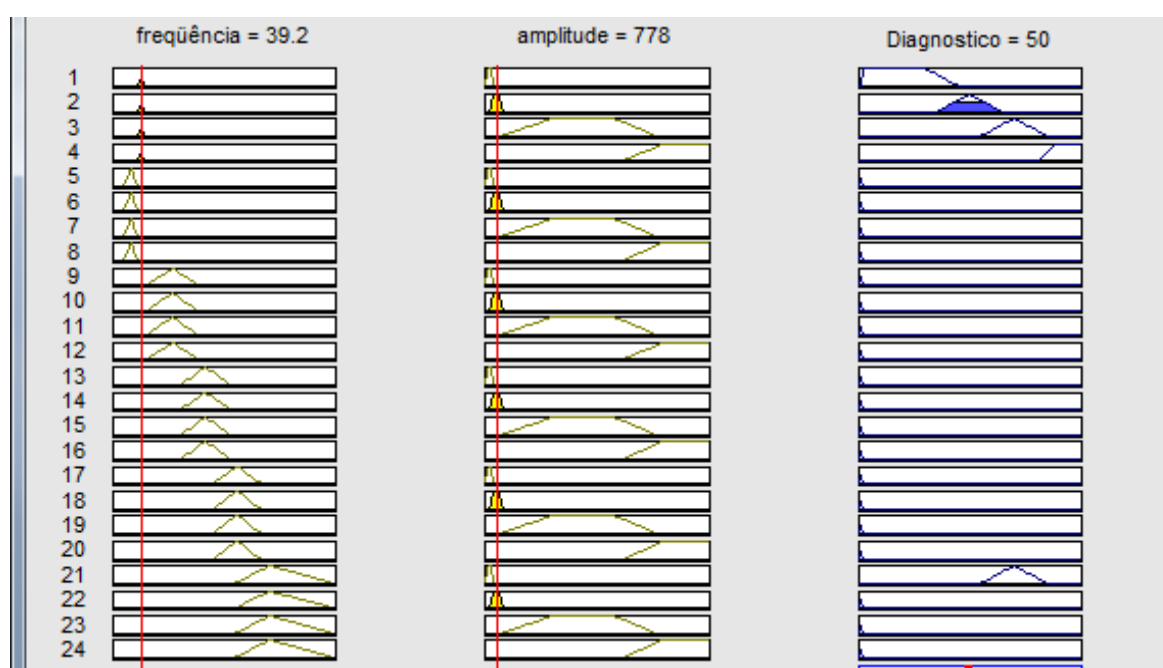


Figura 31 – Execução do SE VBG no aplicativo Matlab
Fonte: Autoria Própria

Na sequência, com o retorno do Sistema Especialista VBG, realiza-se a entrada dos dados no Sistema Especialista DEMOI. A variável condição de operação do SE DEMOI recebe o resultado do SE VBG e, para as outras variáveis de entrada, deve-se imputar os valores para a execução do SE DEMOI.

Para os valores de entrada, têm-se como referência as funções de pertinência de cada variável, onde o valor de entrada para cada variável foi sinalizada com uma seta, conforme ilustrado na Figura 32. As variáveis foram alimentadas da seguinte forma: condição de operação: **Falha Incipiente (valor 50)**; Sazonalidade: **baixa (valor 0,722)**; Custo de Manutenção: **barata (valor 79,4)**;

Manutenibilidade Humana: **Sim (valor 11,3)**; Objetivo Empresa: **Qualidade (valor 0,071)**; e Perfil do Gestor: **Conservador (valor 5,14)**.

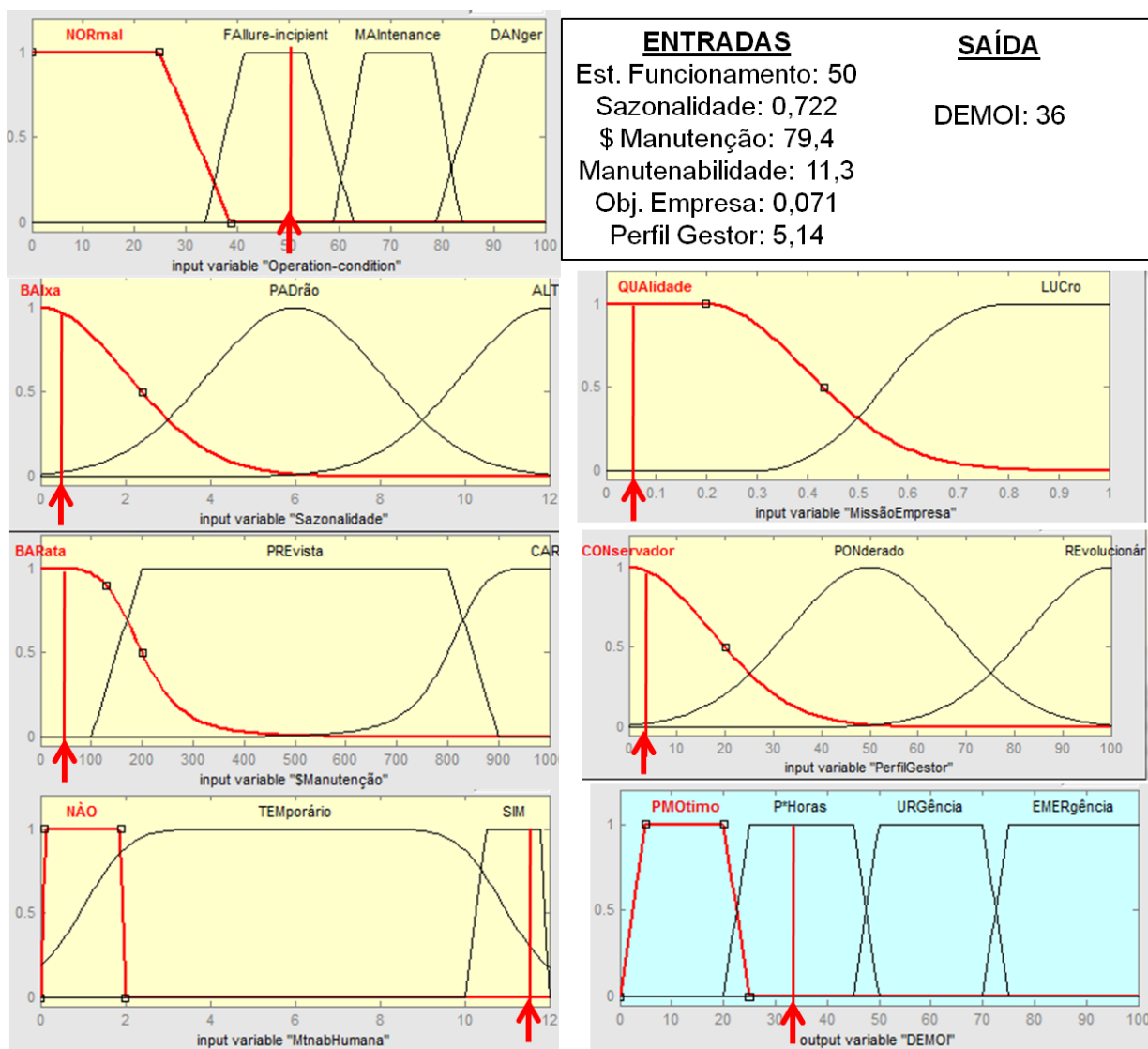


Figura 32 – Variáveis do SE DEMOI e seus respectivos valores
Fonte: Autoria Própria

Na simulação do SE DEMOI realizada no ambiente Matlab™, os dados alimentados foram os definidos anteriormente. Da mesma forma que executado no SE VBG, a linha vermelha representa o valor de entrada para cada variável. Observa-se, por exemplo, que o valor de entrada da variável “condição de operação” é 50 e que este valor pertence ao conjunto “falha incipiente”.

O resultado da inferência do SE DEMOI determina que o momento de intervenção no equipamento deverá ser realizado em um planejamento de horas para a efetuação da manutenção no equipamento, conforme mostrado na Figura 33 e tendo como referência a fuzzificação das variáveis relacionadas ao SE DEMOI, ilustrado na Figura 32. O tempo de retorno para a obtenção da resposta foi de aproximadamente 38 segundos.

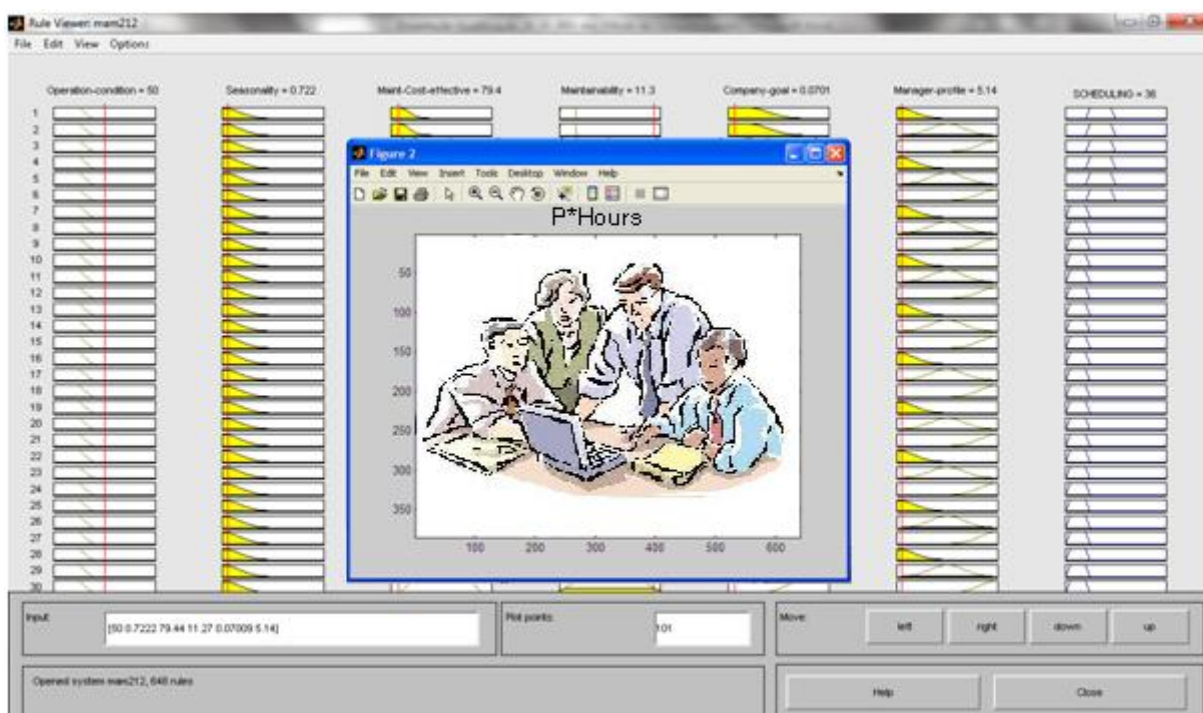


Figura 33 – Execução do SE DEMOI no Matlab™
Fonte: Autoria Própria

4.2 EXECUÇÃO DOS SE'S VBG E DEMOI NO SISTEMA PROPOSTO

Para a simulação do aplicativo proposto, foram utilizados os mesmos valores das variáveis de entrada e as Bases de Conhecimento dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI executados no ambiente MatLab™. Esta simulação do aplicativo proposto tem por finalidade a verificação do tempo de retorno e da conformidade da resposta apresentada para a tomada de decisão.

A Figura 34 mostra a tela inicial do sistema. Nesta tela observam-se o modo de execução do Sistema e a barra de ferramentas com os menus “Configurações” e

“Execução” do sistema. A execução do Sistema pode ser realizada de duas formas, no modo *Offline* ou *Online*, conforme já descrita no item 3.2.2. No Apêndice C, é mostrada uma parte do método para a execução do sistema proposto no modo *Online*.

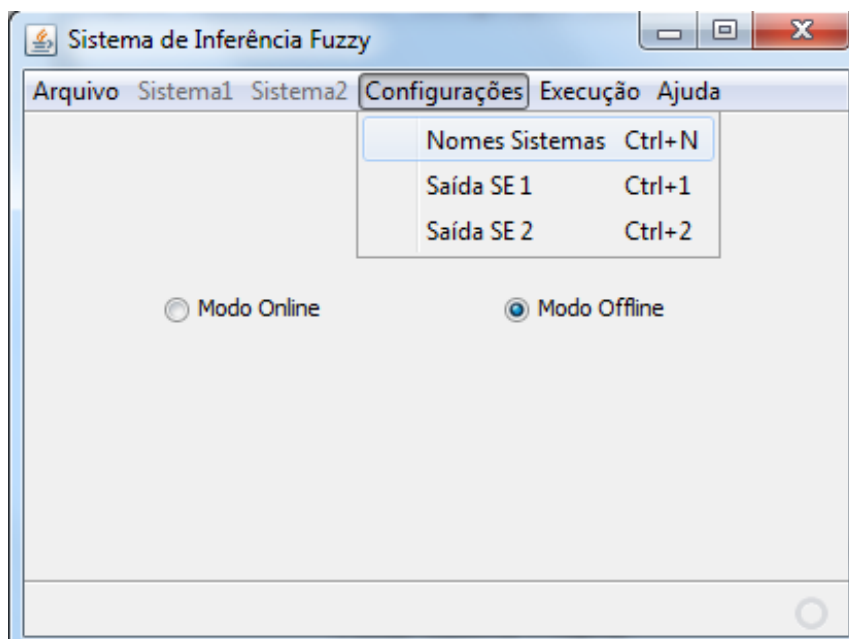


Figura 34 – Modo de execução do sistema
Fonte: Autoria Própria

No item “Configurações” têm-se as seguintes opções: “Nomes dos Sistemas”, “Saída SE 1” e “Saída SE 2”.

Na opção “Nomes dos Sistemas” é atribuído um nome para cada sistema especialista. Esse nome será exibido nas telas de execução e visualização do resultado.

Nas opções de configurações de “Saída SE 1” e “Saída SE 2” são realizadas as parametrizações (Figura 35) dos respectivos gráficos de saída. Estes gráficos serão mostrados no final da execução do sistema com seus respectivos resultados. Nessa tela os parâmetros para a configuração do gráfico de saída são baseados nas funções de pertinência da variável de saída do respectivo Sistema Especialista.

Configuração Saída

Sistema: DEMOI

Condicao	Valor	Saída	Condicao	Valor	Titulo	Alerta
>=	0	X	<=	25	PMOtimo	Planejar Momento Otimo
>	25	X	<=	45	PHoras	Planejamento x horas
>	45	X	<=	75	Urgencia	Urgencia na Manutencao
>	75	X	<=	100	Emergencia	Emergencia na Manutenção

Condição: Saída Condição: Título:

Valor: Valor: Alerta:

Excluir Incluir Salvar Atualizar Condições

Figura 35 – Configuração do gráfico de saída
Fonte: Autoria Própria

Para essa execução foi selecionado o modo *offline* (Figura 34), onde os valores das variáveis de entrada foram inseridos manualmente por meio de uma interface do sistema.

Os valores de entrada para cada variável são inseridos por meio de uma interface, como mostra a Figura 36. Nessa execução foi realizada a entrada das variáveis do SE VBG com os seguintes valores: frequência (**valor 39,2**) e amplitude (**valor 778**). No SE DEMOI foi realizado a entrada com os seguintes valores: Sazonalidade (**valor 0,722**), Custo de Manutenção (**valor 79,4**), Manutenibilidade (**valor 11,3**), Objetivos da empresa (**valor 0,071**) e Perfil do gestor (**valor 5,14**).

Após a determinação dos valores para cada variável de entrada, realiza-se a execução integrada dos SE's VBG e DEMOI, que é acionada pelo botão "Executar".

The screenshot shows a software interface for data entry. It is divided into two main sections: 'Sistema: VBG' on the left and 'Sistema: DEMOI' on the right. Each section contains a table for inputting variable values. Below the tables are output fields labeled 'Saída 1' and 'Saída 2', and a central 'Executar' button.

Variável	Valor
freqüência	39,2
amplitude	778

Variável	Valor
Operation-condition	50
Seasonality	0,722
Maint-Cost-effective	79,4
Maintainability	11,3
Company-goal	0,071
Manager-profile	5,14

Figura 36 – Entrada de valores para as variáveis dos SE VBG e DEMOI
Fonte: Autoria Própria

Com as entradas de valores feitas no aplicativo proposto e após a inferência desses valores com as respectivas Bases de Conhecimento, o resultado final é apresentado pelo Sistema, conforme mostra a Figura 37. Nessa interface são mostrados dois gráficos. O primeiro gráfico de saída mostra o resultado SE (VBG) e o segundo mostra o gráfico de saída do SE DEMOI.

Pelo resultado apresentado, observa-se que o diagnóstico do equipamento é de “falha incipiente” e que a intervenção no equipamento deverá ser realizada em um planejamento em horas. O tempo de retorno para a obtenção da resposta foi de imediato.

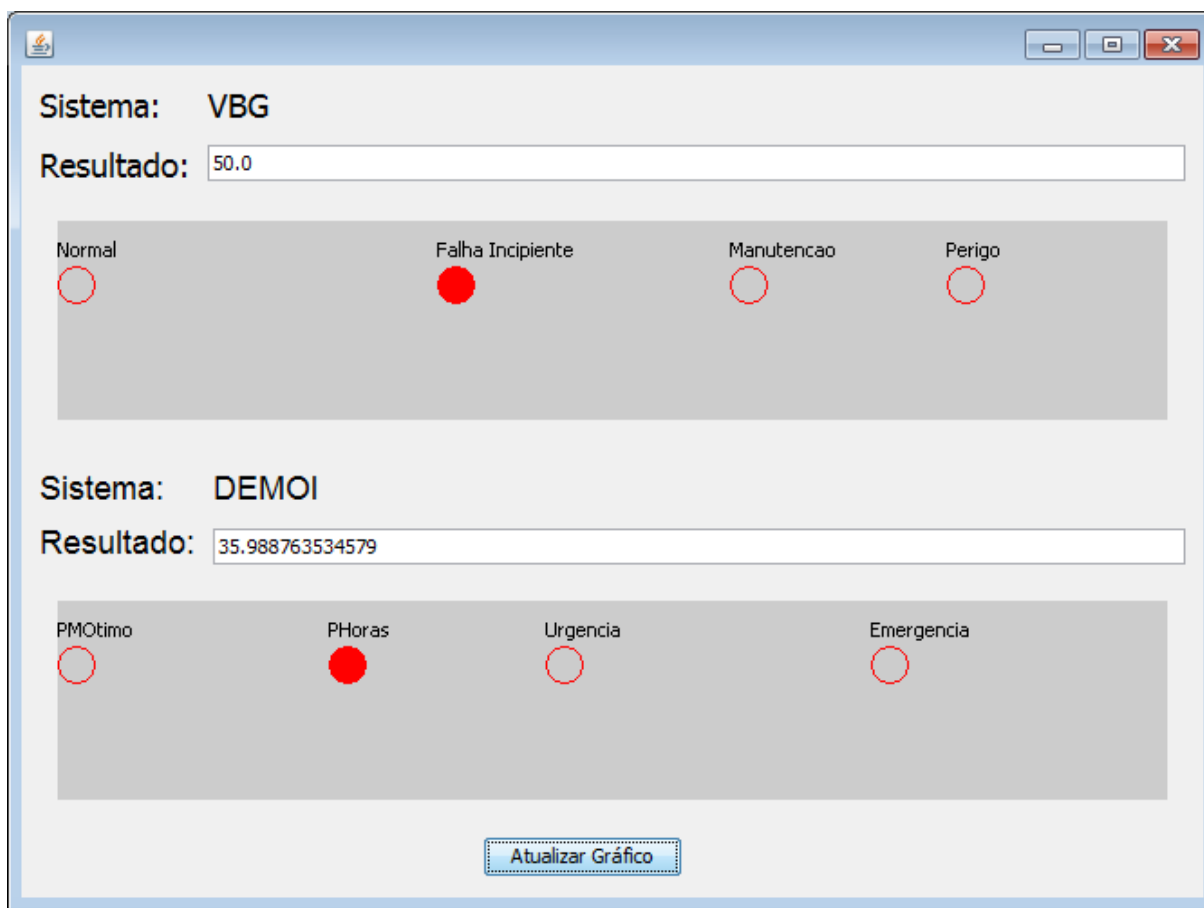


Figura 37 – Resultado apresentado pelo SE proposto
Fonte: Autoria Própria

4.3 VERIFICAÇÃO DO RESULTADO

A verificação do resultado do Sistema proposto foi realizada por meio da ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do software Matlab™. Essa verificação foi obtida com a execução dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI, tanto no ambiente MatLab™, quanto no Aplicativo proposto. Foram utilizados os mesmos valores para as variáveis de entrada nos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI. Os itens 4.1 e 4.2 descrevem a execução dos SE VBG e DEMOI respectivamente no ambiente Matlab™ e no aplicativo proposto.

Conforme os resultados obtidos na resposta mediante a execução do SE VBG e DEMOI no ambiente Matlab™ como no sistema proposto, apresentados nas Figuras 33 e 37, respectivamente, verifica-se que os resultados simulados foram iguais em ambos os Sistemas Especialistas.

4.4 TEMPO DE RETORNO

Para a verificação do tempo de retorno foi utilizado o SE DEMOI, sendo este o sistema que apresenta um elevado tempo de retorno devido ao número de variáveis e regras para seu processamento.

O tempo de retorno varia de acordo com a capacidade de cada computador. Para esse levantamento foi utilizado o equipamento com as seguintes características: Notebook Intelbras N6000W com Processador Intel® Core™ 2 DUO 1.5 GHz com 2 GB de Memória RAM DDR2.

A Tabela 1 mostra o tempo de retorno apresentado na execução do SE DEMOI executado no ambiente Matlab™ e no Aplicativo proposto.

Tabela 1 - Tempo de retorno no Matlab™ e no Aplicativo proposto

Sistema Especialista e Variáveis envolvidas	Número total de Regras	Tempo de retorno do SE no Matlab™	Tempo de retorno no Aplicativo proposto
SE DEMOI	648 Regras	~38 segundos	Imediato

Fonte: Autoria Própria

Conforme observado na tabela anterior, a execução do SE DEMOI, no *software* Matlab™, apresenta o resultado em um tempo de retorno de aproximadamente 38 segundos. Já no sistema proposto, têm-se uma resposta imediata, mesmo com a execução integrada dos Sistemas Especialistas VBG e DEMOI.

4.5 COMPARAÇÃO COM ADIÇÃO DE NOVAS VARIÁVEIS

Para a comparação do tempo de retorno com novas variáveis entre o Sistema proposto e o aplicativo *Fuzzy Logic Toolbox* do Matlab™, foi utilizado o SE DEMOI em três situações.

O primeiro teste apresenta a execução do SE DEMOI com suas variáveis e regras originais, totalizando 648 regras.

No segundo teste foi adicionado ao SE DEMOI uma variável linguística chamada “Relevância” com dois termos “Não” e “Sim”, conforme mostrado na Figura 38, totalizando 1296 regras.

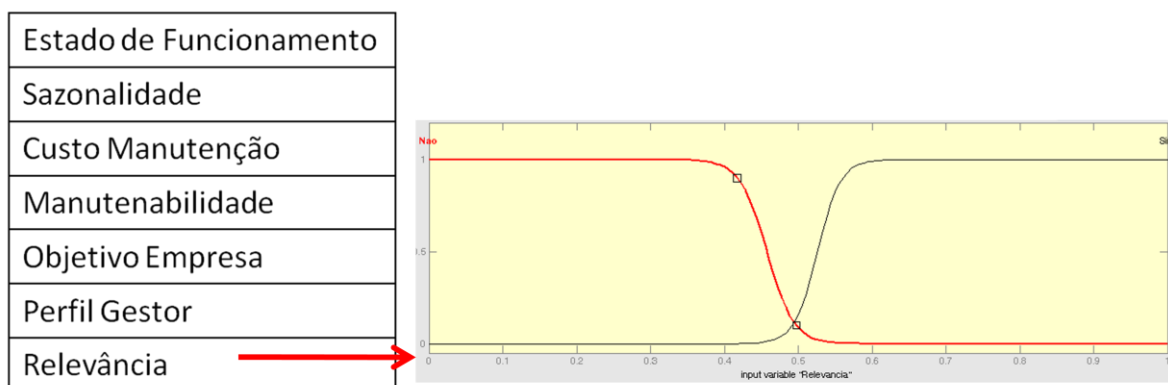


Figura 38 – Variável Linguística “Relevância”
Fonte: Autoria Própria

No terceiro teste foi adicionado mais uma variável “Tempo Manutenção” com três termos “Baixo”, “Médio” e “Alto”, conforme Figura 39, totalizando 3888 regras.

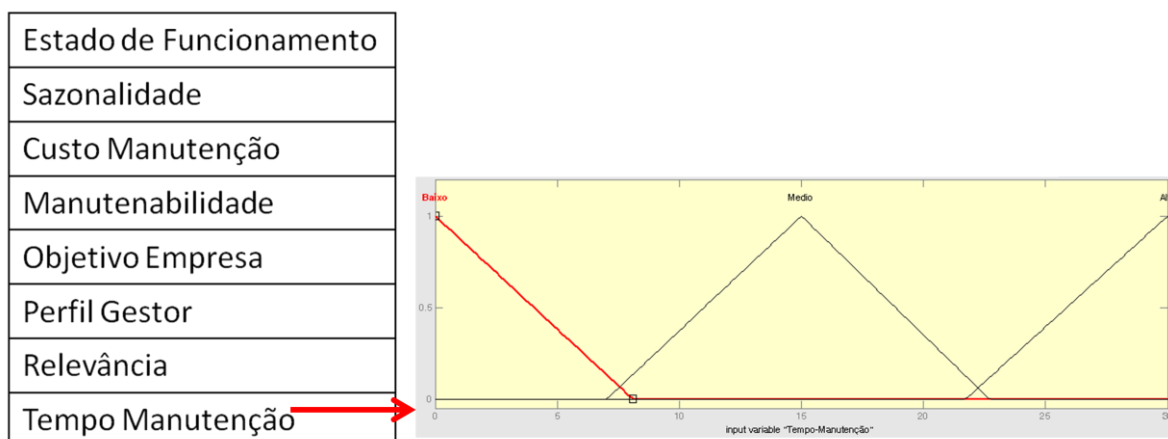


Figura 39 – Variável Linguística “Tempo Manutenção”
Fonte: Autoria Própria

A Tabela 2 mostra o comparativo dos tempos de retorno apresentado pelo SE DEMOI e suas respectivas adaptações, tanto no ambiente Matlab™ quanto no Aplicativo proposto.

Tabela 2 - Comparativo dos tempos de retorno entre Matlab™ e o Aplicativo proposto

	Sistema Especialista e Variáveis envolvidas	Número total de Regras	Tempo de retorno do SE no Matlab™	Tempo de retorno no Aplicativo proposto
1	SE DEMOI	648 Regras	~38 segundos	Imediato
2	SE DEMOI + Adição de uma variável com 2 termos.	1296 Regras	~92 segundos	Imediato
3	SE DEMOI + Adição de duas variáveis. A primeira com dois termos e a segunda com três termos.	3888 Regras	~360 segundos	Imediato

Fonte: Autoria Própria

Na linha 2 da Tabela 2, com a adição da variável “Relevância” contendo os termos “Sim” e “Não”, foram geradas um total de 1296 regras. A execução do SE no Matlab™ precisou de aproximadamente 92 segundos para a obtenção da resposta. Já no sistema proposto, obteve-se a resposta de forma imediata.

Na linha 3 da Tabela 2, com a adição da variável “Tempo Manutenção” contendo os termos “Baixo”, “Médio” e “Alto”, foram geradas um total de 3888 regras. O tempo de execução até a obtenção da resposta levou aproximadamente 360 segundos. Já no aplicativo proposto, obteve-se uma resposta imediata.

Os resultados mostram que, com a adição de novas variáveis e regras, o tempo de retorno aumenta exponencialmente na execução do SE no ambiente Matlab™. Por outro lado, utilizando o sistema proposto, apesar da inclusão de novas variáveis, obteve-se sempre uma resposta imediata.

Adicionalmente, os resultados evidenciam o potencial do Sistema Especialista apresentado como alternativa ao já existente, especialmente em aplicações onde é necessária a execução de Sistemas Especialistas com muitas variáveis e regras a serem consideradas.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi realizado o desenvolvimento de um aplicativo computacional para a integração e melhoria do rendimento de Sistemas Especialistas utilizados na manutenção de equipamentos.

Por meio da utilização das linguagens de programação, JAVA e C, pôde-se criar um sistema para execução de Sistemas Especialistas independente do *software* Matlab™ e propiciar um ambiente de integração direta entre os Sistemas Especialistas VBG e DEMOI, possibilitando a comunicação automática entre variáveis de monitoramento, diagnóstico e tempos ótimos de intervenção de equipamentos.

A verificação do resultado foi realizada por meio da ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do ambiente Matlab™. Essa verificação foi possível com a execução dos SE's VBG e DEMOI, tanto no ambiente Matlab™, quanto no aplicativo proposto. Os mesmos valores de entrada para as variáveis foram utilizados em ambas as execuções. Observou-se que os resultados obtidos com a execução no aplicativo proposto e no ambiente Matlab™ foram similares.

Outra característica observada é que o tempo de retorno é menor com a execução dos SE's VBG e DEMOI no aplicativo proposto. Pôde-se verificar que o tempo de retorno do SE DEMOI no ambiente Matlab™ é de aproximadamente 38 segundos. Já o tempo de retorno do aplicativo proposto, mesmo com a execução integrada dos SE's VBG e DEMOI, é imediato.

Nos testes e verificações do tempo de retorno com a adição de novas variáveis para a simulação de execução do Sistema Especialista DEMOI, pôde-se observar que no ambiente Matlab™ houve um aumento considerável do tempo de retorno em cada situação imposta nos testes. Já com a execução desses mesmos testes no aplicativo proposto, mesmo com a execução integrada do SE VBG e DEMOI, obteve-se o retorno imediato do resultado.

O sistema proposto neste trabalho certamente pode ser aprimorado. Entre essas melhorias destacam-se:

- Desenvolvimento do módulo para o gerenciamento de regras e variáveis do sistema;

- Armazenamento das entradas e dos resultados apresentados pelo sistema para futuras consultas, estudos ou melhorias com base nos dados em histórico.
- Desenvolvimento de novos métodos de saída e alertas personalizados para a obtenção do resultado apresentado pelo sistema.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. de C.; POZZA, E. A.; COSTA, J. de C. B.; CARVALHO, L. G.; ALVES, L. S. **Adaptive neuro-fuzzy inference systems for epidemiological analysis of soybean rust**. Environmental Modelling & Software, v. 26, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462-1994: **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, novembro, 1994.

BARRELLA, W. D. **Sistemas Especialistas Modulados e Abrangentes para a Gestão de Operações**. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

CARLO, F.; BORGIA, O.; TUCCI, M.; RAPACCINI, M. **A Rule Based Expert System for Maintenance as a Competitive Advantage**. Reliability and Maintainability Symposium. IEEE, 2009.

CARDOSO JR., G. **Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

ELY, F.; BIASOLI P. K.; LAMBERT-TORRES G.; MORAES, C. H. V. **Sistema Inteligente para Inspeção de Transformadores**. Anais XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza, 2006.

FRANCO, K. P. M. **Desenvolvimento de um sistema inteligente para auxiliar a escolha de sistema para produção no mar**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia do Petróleo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2003.

FLORES, W. C.; MOMBELLO, E. E.; JARDINI, J. A.; RATTÁ, G.; CORVO, A. M. **Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems**. Expert Systems with Applications, Vol. 28, 2011.

GRAHAM-JONES, P. J. e MELLOR, B. G. **Expert and Knowledge-Based Systems in Failure Analysis**. Engineering Failure Analysis, Vol. 2, 1995.

HERRERO-JIMÉNEZ, C. M. **An expert system for the identification of environmental impact based on a geographic information system.** Expert Systems with Applications, Vol. 39, 2012.

ISHIBUCHI, H. e YAMAMOTO, T. **Rule weight specification in fuzzy rule-based classification systems.** IEEE Transactions on Fuzzy Systems. vol. 13, no. 4, 2005.

KARDEC, A; ZEN, M. **Gestão estratégica e fator humano.** Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002.

KARDEC, A; JOUBERT, F. F.; SEIXAS, E. **Gestão estratégica e indicadores de desempenho** – Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002.

KOTHAMASU, R. HUANG, S. H. e VERDUIN, W. H. **System health monitoring and prognostics: A review of current paradigms and practices.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 28, 2006.

LIAO, S. H. **Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004.** Expert Systems with Applications, Vol. 28, 2005.

MARÇAL, R. F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica Fuzzy.** Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2000.

MARÇAL, R. F. M. **Proposta de um Sistema Especialista baseado em regras (Lógica) Fuzzy para planejar e apoiar a decisão do momento oportuno de efetuar a intervenção da Manutenção de equipamentos que integram os processos de produção.** Pós Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco / PPGEPI / GPSID. Recife, 2006.

MENDES R. D. **Inteligência artificial: sistemas especialistas no gerenciamento da informação.** Ci. Inf., Brasília, v. 26, n. 1, p. 39-45, jan./abr. 1997.

MORAIS, D. R. **Ferramenta Inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004.

MOYA, M. C. **An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes.** Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91 No. 8, pp. 945-63, 2006.

NASCIMENTO JR., N. T. **Uma metodologia para monitoramento das condições operativas de transformadores de potência e análise de tendências baseada em lógica fuzzy.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Eletricidade. Universidade Federal de Maranhão - UFMA. São Luís, 2010.

NASCIMENTO JR, C. L.; Yoneyama T. – **Inteligência artificial em controle e automação.** Editora Edgard Blücher Ltda, S. Paulo – SP, 1ª Edição, 2000.

NGAI E. W. T., WAT F. K. T. **Design and development of a fuzzy expert system for hotel selection.** Omega, Vol. 31, pp 275-286, 2003.

OH, J.; YANG, J.; LEE S. **Managing uncertainty to improve decision-making in NPD portfolio management with a fuzzy expert system.** Expert Systems with Applications, Vol. 39, 2012.

OLIVEIRA JR., H. A. E. ; MACHADO, M. A. S.; CALDEIRA, A. M.; SOUZA, R. C.; TANSCHKEIT, R. **Inteligência Computacional aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab.** 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2007.

ONG, M. H., LEE, S. M. **Evaluating the use of multimedia tool in remote maintenance of production machinery in the automotive sector.** Robotics, Automation and Mechatronics. IEEE Conference on, vol.2, 2004.

PINTELON, L.; PINJALA, S.; VEREECKE, A. **Evaluating the effectiveness of maintenance strategies.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12 No. 1, pp. 7-20, 2006.

PINTO, A. K., XAVIER, J. A. N. **Manutenção: função estratégica.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

_____; _____. **Manutenção: função estratégica** – Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2001.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. N.; BARONI, T. - **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações** – Barueri, SP: Ed Manole, 2005.

SILVESTRE, J.D., BRITO, J. **Ceramic tiling in building façades: Inspection and pathological characterization using an expert system**. Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 1560-1571, 2011.

SOUZA, J. B. **Alinhamento das estratégias do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) com as finalidades e funções do Planejamento e Controle da Produção (PCP): uma abordagem analítica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2008.

SWANSON, L. **An information-processing model of maintenance management**. International Journal of Production Economics, Vol. 83 No. 1, pp. 45-64, 2003.

TANSCHKEIT, R. **Sistemas Fuzzy**. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. VI SBAI. Bauru: Anais de Minicursos, 2003.

TURBAN, E., ARONSON, J. E. **Decision support systems and intelligent systems**. Prentice Hall International Editions, 6th edition, Upper Saddle River, NJ, 2001.

VELDMAN, J.; Klingenberg, W.; Wortmann, H. **Managing condition-based maintenance technology: A multiple case study in the process industry**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. Vol. 17 No. 1, 2011.

VIANA, H. R. G. **PCM, Planejamento e controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

WANG, Y.; LI, Q.; CHANG, M.; CHEN, H.; ZANG, G. **Research on Fault Diagnosis Expert System Based on the Neural Network and the Fault Tree Technology**. Procedia Engineering, Vol. 31, 2012.

ZADEH, Lotfi A. **Fuzzy sets. Information and Control.** New York. Academic Press 8, pp 338-353, 1965.

ZHI-LING, Y. BIN, W. XING-HUI, D. HAO, L. **Expert System of Fault Diagnosis for Gear Box in Wind Turbine.** Systems Engineering Procedia, Vol. 4, 2012.

APÊNDICE A - Métodos para gravação dos dados de entrada

```

public void gravarArquivo(String texto) {
    String conteudo = texto;
    try {
        // o true significa q o arquivo serÃ; constante
        FileWriter x = new FileWriter("C:\\FIS\\"+arquivo, true);
        //conteudo += "\n"; // criando nova linha e recuo no arquivo
        x.write(conteudo); // armazena o texto no objeto x, que aponta para o arquivo
        x.close(); // cria o arquivo
    } // em caso de erro apresenta mensagem abaixo
    catch (Exception e) {
        JOptionPane.showMessageDialog(null, e.getMessage(), "Atenção, NÃO foi possível
    }
}

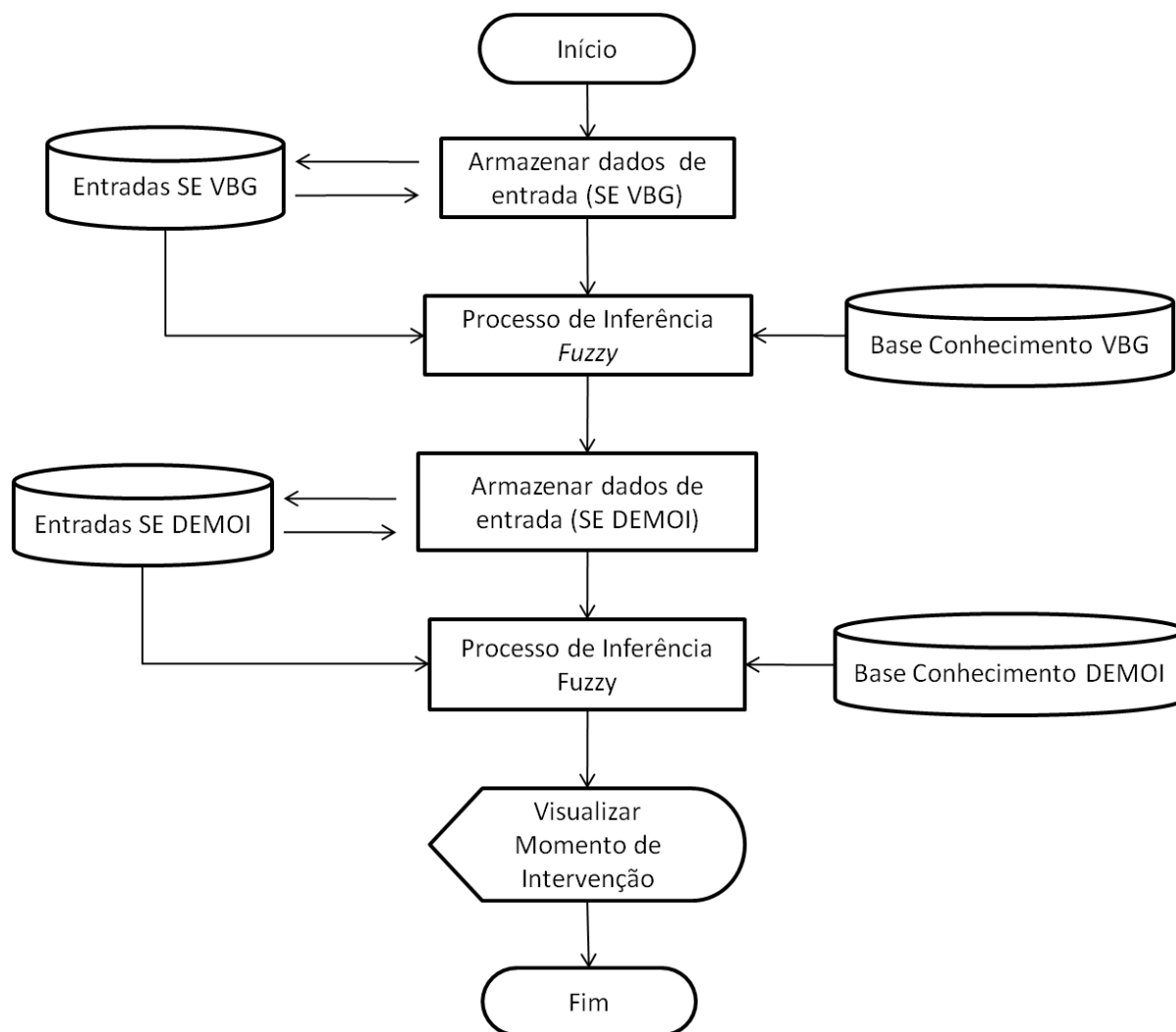
```

```

public void gravarValorSaida(Double valorSaida){
    String arquivo = arquivos.getarqValues2();
    RNArquivoValues rnAValues = new RNArquivoValues(arquivo);
    String texto = "";
    RNArquivoValues rnAValues2 = new RNArquivoValues(arquivos.getarqValues2());
    ArrayList<Double> listValues2 = rnAValues2.getValuesInputs();
    int qtde = listValues2.size();
    texto = String.valueOf(valorSaida) + " ";
    for (int i=1;i<qtde;i++){
        texto = texto + listValues2.get(i) + " ";
    }
    System.out.println("Texto para o arquivo 2: " + texto);
    rnAValues.limparArquivo(arquivo);
    rnAValues.gravarArquivo(texto);
}

```

APÊNDICE B - Fluxograma do Sistema proposto



APÊNDICE C - Método para execução do SE em modo *online*

```
private void iniciarLoop() {  
    while(true){  
        //Executar(primeiro SE)  
        double primeiraSaida = new RNRun().rodarFuzzy("inputsSE1", "RegrasSE1.fis");  
        //Gravar valor saida do SE 1 na entrada do segundo SE  
        gravarValorSaida(primeiraSaida);  
        //Executar e pegar resultado do segundo SE  
        double segundaSaida = new RNRun().rodarFuzzy("inputsSE2", "RegrasSE2.fis");  
        //Atualizar gráfico  
        atualizarGrafico(segundaSaida);  
        try{  
            //sleep for 4000 ms  
            Thread.currentThread().sleep(4000);  
        }  
        catch(InterruptedException ie){  
        }  
    }  
}
```