

SIMPel: Sistema Inteligente Híbrido para Apoio a Manutenção Preditiva em Equipamentos Lubrificados

Fabiano Losilla de Carvalho¹, Veronica Oliveira de Carvalho²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
Araraquara – SP – Brasil

²Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Univ Estadual Paulista (UNESP)
Caixa Postal 178 – Rio Claro – SP – Brasil

logsilla@gmail.com, veronica@unesp.com.br

Abstract. *Aiming to improve productivity ALL, as many other companies, has sought to improve its predictive maintenance processes to ensure equipment availability. Such maintenance is performed on lubricated equipments through oil analysis and other information about the equipment. However, obtaining a consistent diagnosis is laborious due to the amount of rules and conditions involved. Therefore, this article presents the SIMPel, a hybrid intelligent system, based on fuzzy set theory and expert systems, that automates the diagnosis of maintenance of ALL's lubricated equipments. The system is in use, and presented an excellent performance in tests.*

Resumo. *Em busca do aumento da produtividade a ALL, como muitas outras empresas, tem buscado aprimorar seus processos de manutenção preditiva para garantir a disponibilidade dos equipamentos. Essa manutenção em equipamentos lubrificados é realizada por meio da análise de óleo e outras informações sobre o equipamento. Entretanto, a obtenção de um diagnóstico consistente é trabalhosa devido à quantidade de regras e condições envolvidas. Nesse contexto, este artigo apresenta o SIMPel, um sistema inteligente híbrido, baseado na teoria de conjuntos fuzzy e sistemas especialistas, que automatiza o diagnóstico de manutenção dos equipamentos lubrificados da ALL. O sistema encontra-se em uso, tendo apresentado um excelente desempenho no testes realizados.*

1. Introdução

A necessidade das empresas de serem cada vez mais competitivas faz com que elas busquem a cada dia novas técnicas visando o aumento de produtividade e, conseqüentemente, maiores lucros. Uma maneira de garantir essa produtividade é assegurando a disponibilidade dos equipamentos da empresa, a qual pode ser alcançada com uma boa política de manutenção. Dentre as políticas de manutenção encontra-se a preditiva, a qual verifica a evolução do desgaste dos equipamentos. Esse tipo de manutenção só é realizada quando se constata um desgaste excessivo no equipamento, possibilitando que a ação seja tomada antes que o equipamento efetivamente falhe, reduzindo assim os custos.

A realização de manutenção preditiva em equipamentos lubrificados como locomotivas, empilhadeiras, etc., pode ser realizada a partir da análise de óleo. Essa análise, utilizada em diversos setores das indústrias, tem como objetivo verificar a deterioração

do lubrificante e, juntamente com outras informações, controlar o estado operativo dos equipamentos [Toms and Toms 2010]. Assim, a ação preditiva de manutenção dos equipamentos é condicionada, entre outros fatores, ao diagnóstico de deterioração. Esse diagnóstico é obtido considerando os resultados das análises laboratoriais do óleo, as quais podem ser realizadas por diferentes métodos [Mobley 2002], os quais quantificam os contaminantes (ferro, etc.) encontrados no óleo. Entretanto, os resultados obtidos por esses métodos devem ser interpretados considerando-se os modelos de equipamento, uma vez que os limites de contaminação utilizados para avaliar as condições do óleo e, posteriormente, o estado operativo do equipamento, são dependentes da especificação do modelo e da operação por ele desenvolvida (carregamento de minério de ferro, etc.).

Nesse contexto, foi desenvolvido um sistema inteligente híbrido, denominado SIMPel, para apoiar os especialistas da empresa América Latina Logística (ALL)¹ na tarefa de manutenção preditiva, especificamente os alocados na Oficina de Manutenção de Locomotivas localizada na cidade de Araraquara-SP. O SIMPel, objeto de estudo deste artigo, visa informar a ação preditiva a ser realizada a fim de melhorar a disponibilidade dos equipamentos.

Antes do SIMPel, os especialistas da ALL realizavam manualmente todo o processo de obtenção do diagnóstico preditivo. A obtenção de um diagnóstico consistente se torna trabalhosa devido à quantidade de regras e condições: para se definir as ações preditivas, os especialistas se deparam com uma grande diversidade de equipamentos e com diferentes ambientes aos quais os equipamentos podem ser expostos, fatores que influenciam a decisão a ser tomada. Além disso, o histórico de manutenção dos equipamentos também contribui significativamente para a decisão. Portanto, o esforço envolvido para se obter um único diagnóstico é grande. Desse modo, diante da necessidade de se desenvolver um sistema capaz de lidar com várias regras e condições, a fim de facilitar a obtenção de um diagnóstico preditivo consistente, evitando a sobrecarga da equipe técnica, o SIMPel foi desenvolvido.

Avaliando a problemática e os procedimentos da empresa, observou-se que o SIMPel poderia ser modelado adequadamente como um sistema inteligente híbrido associando-se a teoria de conjuntos fuzzy [Zadeh 1965, Berkan and Trubatch 1997] com a técnica de sistemas especialistas [Giarratano and Riley 2004, Negnevitsky 2005]. O SIMPel, a partir dos resultados das análises laboratoriais, classifica inicialmente o estado do óleo em categorias (Bom, Regular ou Ruim), detectando os contaminantes que contribuíram para a classificação. Em seguida, utiliza a classificação do óleo e os contaminantes identificados como parte do conhecimento necessário para que seja realizado um diagnóstico que permita identificar qual ou quais as ações que devem ser realizadas para evitar a quebra do equipamento.

O SIMPel apresentou um excelente desempenho durante os testes realizados, aproximadamente 97%, diagnosticando inclusive situações que antes não eram notadas pelo especialista. O SIMPel encontra-se em uso e em estudo para ser integrado ao SAP da empresa.

Este artigo encontra-se estruturado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados os procedimentos adotados antes do SIMPel, os métodos de análise de óleo utilizados

¹<http://www.all-logistica.com/port/index.htm>.

pela empresa e, portanto, considerados neste trabalho, assim como outros trabalhos que resolvem esse mesmo tipo de problema; a Seção 3 apresenta o SIMPel e seu funcionamento; a Seção 4 apresenta os resultados obtidos durante os testes; por fim, a Seção 5 apresenta a conclusão e os trabalhos futuros.

2. Background, Conceitos e Trabalhos Relacionados

A princípio, é necessário compreender os procedimentos adotados pela empresa antes do SIMPel para que se entenda a necessidade de se desenvolver um sistema de apoio aos especialistas da ALL e a importância de se utilizar técnicas inteligentes para modelar o problema. Para tanto, essa seção apresenta na Seção 2.1 uma descrição desses procedimentos e a justificativa de escolha da utilização de sistemas fuzzy e especialista com base nessa descrição. Além disso, essa seção apresenta também alguns conceitos necessários ao entendimento do artigo (Seção 2.2) e alguns trabalhos relacionados (Seção 2.3).

2.1. Background

Como mencionado anteriormente, os especialistas da ALL realizavam manualmente todo o processo de obtenção do diagnóstico preditivo. Inicialmente, após a obtenção dos resultados das análises laboratoriais, os especialistas qualificavam linguisticamente cada contaminante contido no óleo em Bom, Regular ou Ruim. Para tanto, utilizavam tabelas adaptadas das constantes no manual do fabricante do equipamento em análise (alteradas de modo a atender as necessidades reais da empresa). Essas tabelas contém os limites de contaminação do óleo que o tornam prejudicial ao equipamento. É importante mencionar que embora os especialistas usassem valores linguísticos (imprecisos em sua natureza), os mesmos estavam associados a limites exatos de contaminação. Em seguida, com base em uma nova tabela por eles construída a partir de suas experiências, os especialistas classificavam o óleo em Bom, Regular ou Ruim, a partir da qualificação atribuída anteriormente aos contaminantes, tornando essa classificação independente do modelo de equipamento utilizado. A partir dessa classificação, os especialistas examinavam a base histórica do equipamento em busca de informações relevantes a fim de emitir um diagnóstico sob a condição operativa do mesmo.

Desse modo, a decisão por se utilizar a teoria de conjuntos fuzzy foi tomada para se realizar a classificação do óleo em função das características do domínio: (i) uma vez que os especialistas qualificam linguisticamente, inicialmente, cada contaminante como Bom, Regular ou Ruim, cada contaminante pode ser modelado como uma variável linguística de entrada, cujos conjuntos fuzzy são definidos em função dos limites de contaminação. Desse modo, se cada modelo contiver seus respectivos conjuntos fuzzy associados a cada variável linguística de entrada é possível qualificar os contaminantes qualquer que seja o modelo utilizado; (ii) assim como os especialistas faziam manualmente, a partir do momento que os contaminantes são qualificados, pode-se utilizar uma base única de regras para classificar o óleo, já que a mesma será composta pela combinação dos termos linguísticos das variáveis de entrada. Assim, a classificação pode ser realizada independente do modelo do equipamento e do ambiente ao qual ele esteja exposto; (iii) indiscutivelmente, a existente necessidade de se modelar o problema por meio de variáveis qualitativas e regras linguísticas, de modo a aproximar o processo de decisão humana da decisão computacional. Já a decisão por se utilizar sistemas especialistas foi tomada para que ações preditivas pudessem ser obtidas, uma vez que essa

técnica gera questionamentos aos usuários para coletar informações necessárias à tomada de decisão, nesse caso, informações relacionadas ao histórico dos equipamentos. Além disso, essa técnica proporciona facilidades na inserção de novos conhecimentos, já que a base de conhecimento não é vinculada à implementação do código do sistema.

2.2. Conceitos

A análise de óleo tem como objetivo verificar a deterioração do óleo para controlar o estado operativo dos equipamentos [Toms and Toms 2010]. A metodologia de controle consiste em medir a taxa de contaminação do óleo e analisar essa contaminação. O que ocorre é que, com o passar do tempo, as peças se desgastam e por receberem a lubrificação do óleo passam a contaminá-lo com os materiais existentes em sua composição [Toms and Toms 2010]. Em uma análise de óleo padrão são aplicados basicamente três métodos. Esses métodos, descritos a seguir, foram os considerados neste trabalho para classificar o óleo em categorias, uma vez que os mesmos são os utilizados atualmente pela empresa.

A *análise físico-química* mede as propriedades do óleo referente a viscosidade e a diluição. A viscosidade determina o valor da resistência que o óleo tem ao escoamento, isto é, o quanto o óleo consegue permanecer entre as partes do equipamento [Toms and Toms 2010]. A viscosidade pode ser medida em VsSu (temperatura ambiente) e em VcSt (temperatura em condições de trabalho). Já a diluição determina o grau de contaminação do óleo através do contato com o combustível utilizado pelo equipamento [Toms and Toms 2010]. A diluição é caracterizada geralmente por vazamentos internos do sistema de combustível ou ainda queima inadequada do combustível. A diluição influencia a viscosidade do óleo deixando-o mais fino, permitindo assim que as peças móveis dos equipamentos entrem em atrito [Mobley 2002]. A *espectrometria por infravermelho* analisa o teor de água e fuligem. Quando o óleo está contaminado com água ocorre a deterioração dos aditivos, além de corrosão das partes metálicas [Mobley 2002]. Já a fuligem determina a eficiência da queima de combustível [Mobley 2002]. A fuligem influencia a viscosidade do óleo deixando-o mais grosso, fazendo com que o equipamento tenha que realizar um esforço maior para obter a mesma condição de trabalho podendo causar, em condições extremas, o travamento do equipamento. A *espectrometria por emissão óptica* realiza a contagem das partículas dos metais presentes no óleo [Toms and Toms 2010]. A medição é contabilizada em ppm: parte por milhão. Os metais considerados pela empresa são: ferro, cromo, chumbo, cobre, alumínio, prata, zinco, estanho e silício. Cada metal está associado com o desgaste de algumas das partes internas dos equipamentos.

2.3. Trabalhos Relacionados

Embora existam diversos softwares comerciais que visem resolver o problema aqui apresentado, esses são em geral de propriedade das empresas que fazem a análise laboratorial do óleo, sendo disponibilizados somente quando se contrata o serviço de análise. Portanto, como forma de garantir propriedade e projetar funcionalidades para suas necessidades optou-se por desenvolver o SIMPel, como no caso descrito em [Kreyn et al. 2007]. [Toms 1996] discute a utilização de sistemas especialistas no contexto da análise de óleo e a necessidade de se modelar o problema em etapas. O autor apresenta um processo dividido em quatro etapas: (i) aquisição de dados, etapa em que os dados são preparados; (ii) indicadores de condição, etapa em que se identificam os sintomas e urgências

de manutenção; (iii) diagnóstico dos problemas (falhas), obtido a partir da avaliação dos sintomas obtidos em (ii); (iv) diagnóstico de manutenção, obtido a partir dos problemas identificados em (iii) juntamente com dados históricos de manutenção. Por outro lado, [Sala et al. 2007, Macián et al. 2006] apresentam um sistema baseado na teoria de conjuntos fuzzy para modelar o problema, uma vez que afirmam que modelagens baseadas em lógicas binárias fazem com que a base de conhecimento cresça de modo exponencial. O sistema por eles proposto é composto por três módulos: (i) pré-processamento dos dados, comparado a etapa (i) do trabalho de [Toms 1996]; (ii) inferência, onde se identificam os problemas encontrados no equipamento a partir de um conjunto de sintomas; (iii) pós-processamento, onde se apresentam os problemas identificados em ordem de relevância. [Sala et al. 2007, Macián et al. 2006] também discutem a necessidade de se acoplar ao módulo de pós-processamento conhecimentos relacionados às ações preditivas a serem realizadas para solucionar os problemas. Além disso, os autores destacam a importância de se considerar outras informações do domínio, como os dados históricos do equipamento, para que o diagnóstico seja o mais confiável possível.

Uma vez que o objetivo do SIMPel é diagnosticar a ação preditiva, diferentemente dos trabalhos acima descritos, os problemas (falhas) não são apresentados ao usuário, embora os mesmos sejam implicitamente analisados com base nos contaminantes considerados fora de padrão (não bons). Por outro lado, assim como nos demais trabalhos, o SIMPel apresenta explicitamente a gravidade dos problemas por meio da classificação do óleo, onde: (i) óleo bom indica que não existem problemas e que o equipamento pode prosseguir trabalhando; (ii) óleo regular indica que existem problemas de gravidade intermediária e que é necessário o agendamento de manutenção; (iii) óleo ruim indica problemas graves e, portanto, que o equipamento deve ter sua operação interrompida e ser encaminhado imediatamente para a manutenção. Além disso, como discutido em [Sala et al. 2007, Macián et al. 2006], o SIMPel considera outras informações para emissão do diagnóstico, entre elas os dados históricos e o ambiente ao qual o equipamento está exposto, permitindo que diferentes taxas de contaminação sejam consideradas para o mesmo equipamento.

3. SIMPel: Objetivo, Arquitetura e Funcionamento

O SIMPel é um sistema inteligente híbrido que tem por objetivo apoiar o processo de obtenção de diagnósticos preditivos para viabilizar o controle do estado operativo dos equipamentos lubrificadas da empresa ALL. O SIMPel foi projetado em módulos, conforme arquitetura apresentada na Figura 1. Os módulos Fuzzy e Especialista são os responsáveis por tornar o sistema inteligente, de modo que ações preditivas sejam emitidas corretamente. Nesse processo, o módulo Fuzzy é responsável por classificar o óleo de acordo com o resultado obtido na análise laboratorial, identificando também os contaminantes (ferro, etc.) que contribuíram para a classificação. Com base na classificação obtida e conhecimentos sobre o equipamento a serem fornecidos interativamente ao sistema, o módulo Especialista é responsável por informar a ação preditiva a ser realizada. Já o módulo Básico é responsável pela base de dados e tem a função de gerenciar: (i) as operações de cadastro, alteração, consulta e exclusão dos equipamentos, os quais são descritos pelo modelo, marca e componente; (ii) as funções de pertinência de cada um dos contaminantes para cada modelo existente utilizadas pelo módulo Fuzzy; (iii) os resultados obtidos pelos módulos Fuzzy e Especialista.

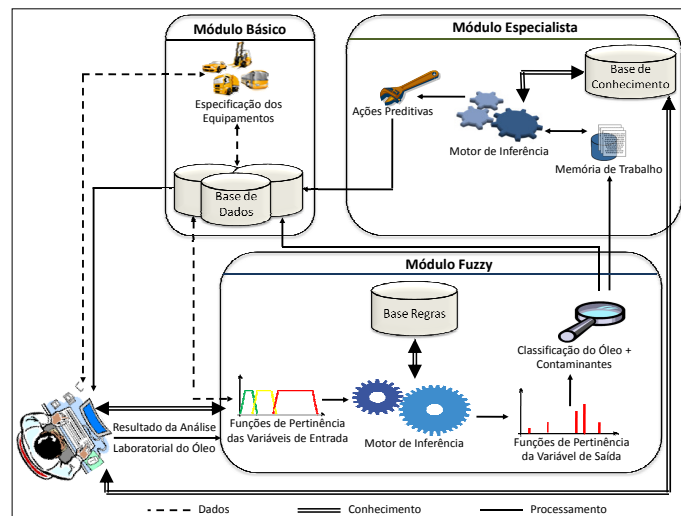


Figure 1. Arquitetura do SIMPel.

O fluxo Dados é ativado sempre que há a necessidade de comunicação com a base de dados. O fluxo Conhecimento fornece o conhecimento do domínio necessário a tomada de decisão. Esse fluxo permite que as funções de pertinência associadas a cada um dos contaminantes, bem como a base de conhecimento, possam ser gerenciadas pelo especialista. Desse modo, novos equipamentos podem ser adicionados ao SIMPel, uma vez que regras relacionadas a novos diagnósticos preditivos podem ser contemplados. Já a base de regras, por ser única para todos os tipos de equipamento, contém todas as associações válidas existentes entre os contaminantes já especificadas não sendo, portanto, acessível. Todo o conhecimento codificado no SIMPel foi obtido por meio de entrevistas junto aos especialistas da empresa. O fluxo Processamento é ativado quando o usuário fornece os valores de cada um dos contaminantes encontrados na análise laboratorial do óleo e solicita que seja realizada a identificação do estado operativo do equipamento. A partir da solicitação, o módulo Fuzzy faz a classificação do óleo e identifica os contaminantes que contribuíram para a classificação. Em seguida, os resultados obtidos nesse módulo são utilizados pelo módulo Especialista, agregados a outros conhecimentos do equipamento, para emissão do diagnóstico.

O SIMPel foi implementado em Java e o banco de dados utilizado foi o MySQL. É importante mencionar que os módulos inteligentes foram projetados de modo a se complementarem, permitindo que o conhecimento do domínio seja facilmente ampliado e ajustado a novas situações. Assim, para melhor compreensão do sistema, são apresentados a seguir os detalhes dos módulos Fuzzy e Especialista.

3.1. Módulo Fuzzy

O módulo Fuzzy é responsável por classificar o óleo a partir do resultado obtido na análise laboratorial, identificando também os contaminantes que contribuíram para a classificação. Para tanto, os contaminantes são inicialmente qualificados na etapa de fuzzificação. Cada contaminante compõe uma variável linguística de entrada, as quais possuem os termos linguísticos Bom (B), Regular (A) e Ruim (R). Os contaminantes considerados são: viscosidade ($VcSt$ e $VsSu$), diluição (D), fuligem (F), água (A), ferro (Fe), cromo (Cr), chumbo (Pb), cobre (Cu), alumínio (Al), prata (Ag), zinco (Zn), estanho (Sn)

e silício (*Si*). Como a semântica dos termos linguísticos depende do modelo do equipamento, o módulo Fuzzy só é efetivamente ativado se as funções de pertinência referentes a cada um dos contaminantes para o equipamento em análise estiverem cadastradas na base de dados.

Para permitir que o especialista gerencie os conjuntos fuzzy associados a cada variável linguística de entrada para um determinado modelo de equipamento é disponibilizada a interface apresentada na Figura 2. Esses conjuntos modelam de modo gradativo os limites de contaminação, os quais eram avaliados até então por limites exatos. Para que houvesse uma interface unificada para todos os modelos e considerando os procedimentos utilizados pelos especialistas da empresa, todas as variáveis estão associadas a três termos linguísticos, sendo cada termo representado por uma função de pertinência trapezoidal. Como pode ser observado, o SIMPel foi projetado de modo a gerenciar qualquer equipamento, sendo necessário apenas o cadastramento do mesmo na base de dados assim como de seus respectivos limites de contaminação. Embora a empresa utilize diversos modelos de equipamentos para realizar suas operações de logística, atualmente o SIMPel gerencia apenas dois modelos, os quais representam a maioria dos equipamentos.

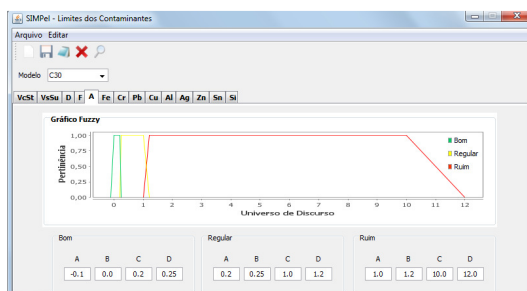


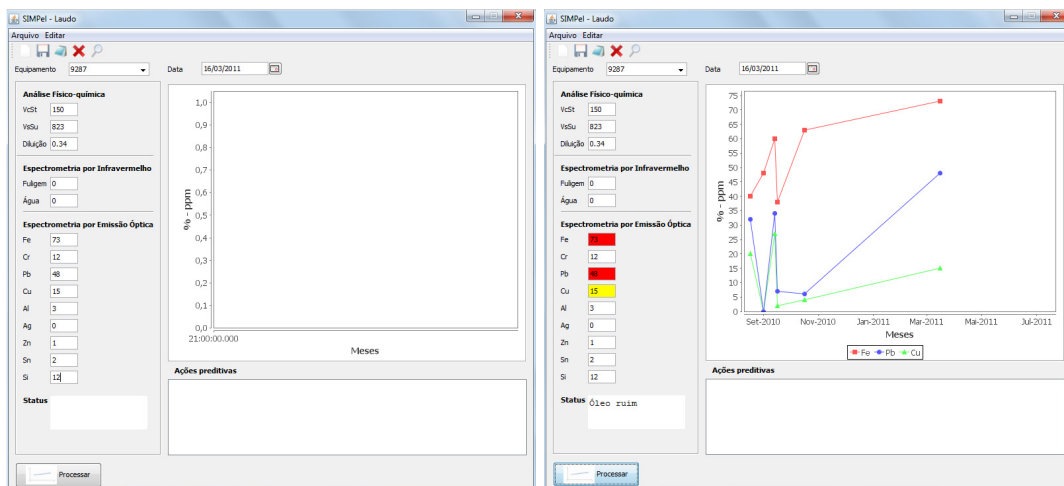
Figure 2. Interface de gerenciamento dos conjuntos fuzzy referentes as variáveis linguísticas de entrada.

O módulo Fuzzy é ativado sempre que o equipamento a ser analisado é selecionado e os valores obtidos no laudo laboratorial do óleo fornecidos (Figura 3(a)). A partir dessas informações o óleo é classificado em Bom, Regular ou Ruim e os contaminantes que contribuíram para a classificação são destacados na cor amarela quando considerados Regular, e vermelha quando considerados Ruim (Figura 3(b)).

A base de regras do módulo foi construída de modo a contemplar apenas as regras consideradas válidas pelos especialistas, regras essas que contêm algumas das possíveis combinações entre os contaminantes. Cada uma das combinações levam a uma das possíveis respostas, ou seja, a uma classificação do óleo com seus respectivos contaminantes. A combinação ocorre por meio do operador E. Uma vez que apenas algumas das combinações são contempladas, caso o SIMPel não consiga classificar o óleo, uma mensagem é emitida informando que não existem regras disponíveis que satisfaçam a condição na qual o óleo se encontra. A regra

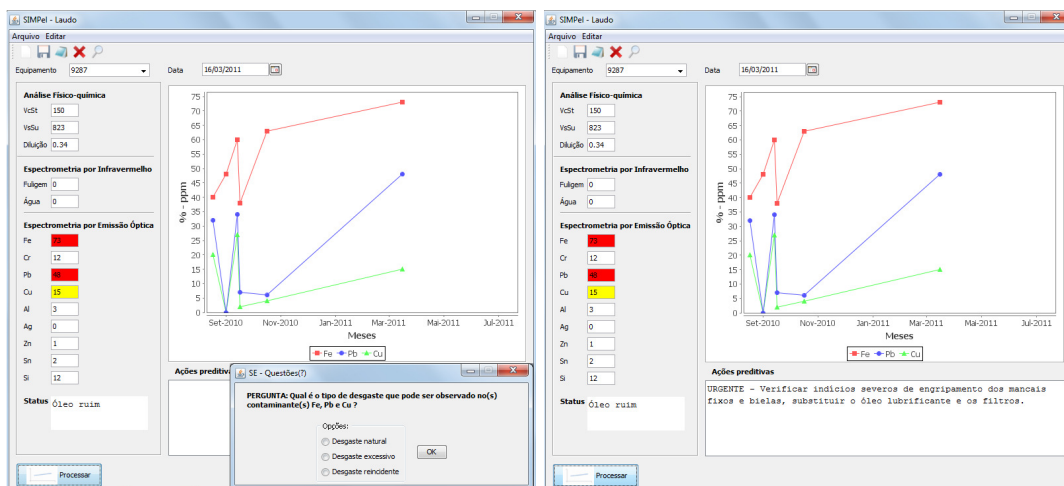
```
SE ((VcSt=Bom) E (VsSu=Bom) E (D=Bom) E (F=Bom) E (A=Bom) E (Fe=Ruim) E (Cr=Bom) E
(Pb=Bom) E (Cu=Bom) E (Al=Bom) E (Ag=Bom) E (Zn=Bom) E (Sn=Bom) E (Si=Reg))
ENTÃO Resposta="Regular:Fe, Si"
```

representa uma das 220 regras codificadas. Observe que no antecedente as variáveis de entrada são combinadas e que no consequente atribui-se à variável de saída *Resposta* um



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure 3. Interface responsável pela inicialização dos módulos Fuzzy e Especialista em diferentes momentos do processo preditivo.

dos seus termos linguísticos. É importante mencionar que essa base de regras é única para todos os equipamentos, uma vez que os contaminantes são agrupados sempre do mesmo modo, sendo necessário apenas que se considere na etapa de fuzificação os conjuntos fuzzy do modelo do equipamento em análise. A variável linguística de saída, *Resposta*, contém 215 termos linguísticos, cada um representado por um conjunto fuzzy do tipo *singleton*. Cada termo representa uma das possíveis classificações (Bom, Regular ou Ruim), as quais podem conter também os contaminantes que influenciaram a classificação, como na regra acima apresentada.

Em relação ao processamento, o módulo é baseado em regras do tipo Mamdani [Mamdani 1977, Berkan and Trubatch 1997] e utiliza os operadores fuzzy padrão, a saber: max para agregação e min para intersecção e implicação. Nos sistemas Mamdani as regras disparadas geram resultados parciais que são agregados para formar uma única saída final na forma de conjunto fuzzy. Esse conjunto pode ser então defuzificado para a obtenção de uma saída numérica precisa. No caso deste trabalho, a defuzificação não é

realizada, uma vez que o objetivo do módulo é classificar linguisticamente o óleo, assim como identificar os contaminantes que contribuem para a classificação. Desse modo, para que a classificação seja realizada o SIMPel considera como resposta o termo linguístico (conjunto fuzzy do tipo *singleton*) associado a variável de saída *Resposta* que apresentar o maior grau de ativação.

Diante do apresentado, uma vez que o módulo é ativado, o processamento ocorre da seguinte maneira (vide Figura 1): (A) recuperam-se os limites de contaminação (conjuntos fuzzy) do equipamento associados a cada variável linguística de entrada para que a fuzificação seja realizada; (B) após obter-se os graus de pertinência de cada variável de entrada em cada um de seus respectivos conjuntos fuzzy, o processo de inferência é inicializado; (C) após o processo de inferência, realiza-se a agregação dos conjuntos fuzzy associados a variável de saída *Resposta*; (D) ao final, o termo linguístico associado a variável *Resposta* que apresentar o maior grau de ativação determina a classificação.

A implementação desse módulo foi gerada a partir do Xfuzzy², ambiente de desenvolvimento de sistemas fuzzy. Assim, inicialmente a modelagem do problema foi realizada nesse ambiente e, após a geração e importação do código Java para o SIMPel, modificações foram realizadas para permitir que diversos equipamentos pudessem ser analisados.

3.2. Módulo Especialista

O módulo Especialista é responsável por fornecer as ações preditivas a serem tomadas para que o equipamento não falhe. Para tanto, o módulo recupera o modelo do equipamento em análise e o resultado obtido no módulo Fuzzy. Esse resultado é combinado com outras informações a serem fornecidas pelo usuário durante o processamento do módulo para que o diagnóstico preditivo seja informado.

Antes que o módulo seja efetivamente inicializado, o SIMPel recupera da base de dados, apenas para os contaminantes identificados no módulo Fuzzy, os resultados numéricos obtidos nas últimas análises laboratoriais realizadas (até dez resultados) e os apresenta graficamente (Figura 3(b)) juntamente com o resultado atual. O gráfico permite que o usuário analise, identifique e, posteriormente, forneça informações sobre o comportamento histórico dos contaminantes envolvidos na classificação atual do óleo.

O processo de aquisição de conhecimento referente a construção da base de conhecimento foi realizado por meio de entrevistas com os especialistas do domínio. Para obtenção das ações preditivas, a base relaciona as informações obtidas no módulo Fuzzy com informações históricas do equipamento. O conhecimento foi representado por meio de regras de produção. A base é composta por 107 regras, sendo 82 conclusivas e 25 geradoras de fatos (informações) (divisão baseada em [Bittencourt 2001]). As regras

```
SE      ((modelo="X") OU (modelo="Y"))
ENTÃO  tipoDesgaste={"Desgaste natural","Desgaste excessivo","Desgaste reincidente"}

SE      ((modelo="X") OU (modelo="Y")) E (contaminante="F") E (ClassificacaoOleo="Regular") E
      (tipoDesgaste="Desgaste excessivo") E ((manutencao="Sim") OU (manutencao="Não"))
ENTÃO  "Verificar o sistema de combustível com intuito de encontrar uma injeção irregular."
```

representam, respectivamente, uma das 25 regras geradoras e uma das 82 regras conclusivas. As regras geradoras, quando satisfeitas, geram questionamentos ao usuário.

²<http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/>.

Os possíveis questionamentos a serem feitos ao usuário a partir dessas regras são: (i) Qual é o tipo de desgaste que pode ser observado no(s) contaminante(s) X? [Natural;Excessivo;Reincidente]; (ii) Foi realizada manutenção no equipamento? [Sim;Não]; (iii) O óleo foi substituído? [Sim;Não]; (iv) Em qual equipamento foi realizada a manutenção por contaminação pelo(s) contaminante(s) X? [Anéis;Balancins;etc.]. Os valores entre [] representam as possíveis respostas (exceção a pergunta (iv), na qual estão listadas apenas algumas das possíveis respostas). O X presente nas perguntas (i) e (iv) é preenchido automaticamente pelo SIMPel e se refere aos contaminantes destacados (em amarelo ou vermelho) que influenciaram a classificação atual do óleo. A pergunta (i) está relacionada ao gráfico descrito anteriormente.

O raciocínio implementado no motor de inferência foi o encadeamento progressivo. A fim de facilitar a implementação, esse módulo utiliza o Drools³, mais especificamente o Drools Expert, um motor de inferência que usa a abordagem baseada em regras para implementar sistemas especialistas. O Drools Expert é totalmente integrável ao Java e já disponibiliza os raciocínios progressivo e regressivo, uma representação de conhecimento baseada em regras, o reteOO (otimização do algoritmo rete [Forgy 1982]) como estratégia de busca, memória de trabalho, estratégias de resolução de conflitos, etc. Complementando a necessidade do módulo, a interface foi construída utilizando-se a API Swing do Java, uma vez que essa não é implementada diretamente pelo Drools.

Diante do apresentado, uma vez que o módulo é ativado, o processamento ocorre da seguinte maneira (vide Figura 1): (A) inicialmente, o modelo do equipamento, a classificação do óleo e os contaminantes que influenciaram a classificação são adicionados à memória de trabalho, ou seja, são eles os fatos iniciais a serem utilizados durante o processo de inferência; (B) a partir dos fatos iniciais, o motor de inferência verifica se alguma das regras conclusivas que compõe a base de conhecimento é satisfeita. Enquanto nenhuma regra conclusiva for satisfeita, ou seja, enquanto não se obtiver um diagnóstico preditivo de manutenção, as regras geradoras serão ativadas, uma por vez, até que se obtenha um diagnóstico. Cada uma dessas regras gerará questionamentos ao usuário (Figura 3(c)). As informações fornecidas pelo usuário, por meio de perguntas e respostas, serão armazenadas na memória de trabalho como novos fatos; (C) uma vez satisfeita uma regra conclusiva, o diagnóstico preditivo é fornecido ao usuário (Figura 3(d)) e a execução termina. Caso todas as regras conclusivas tenham sido verificadas e nenhum diagnóstico tenha sido encontrado, o SIMPel informa que não existe nenhuma regra capaz de provar os fatos informados e solicita ao usuário que uma nova regra seja inclusa na base de conhecimento.

4. Avaliação do SIMPel

Com o objetivo de avaliar o desempenho do SIMPel, 161 casos de teste foram considerados. Os testes basearam-se em diagnósticos preditivos reais gerados pelo especialista da empresa no período de 2004 a 2007 para quatro equipamentos distintos, sendo dois de um determinado modelo e dois de um outro modelo.

O SIMPel obteve 97.52% de acerto. Os 2.48% (4 casos dos 161) considerados inicialmente como erros foram encaminhados ao especialista para que os resultados pudessem ser verificados. Após análise, o especialista concluiu que em dois dos quatro

³<http://www.jboss.org/drools>.

casos, se o SIMPel tivesse sido utilizado teria-se evitado que um dos equipamentos viesse a ser danificado ao ponto de necessitar a substituição de peças. Para esses dois casos, o especialista havia concluído que o óleo era bom e, portanto, que o equipamento estava em boas condições de uso. Por outro lado, o SIMPel indicou que o óleo estava regular em função do contaminante *Al* e, considerando o histórico do equipamento, disparou algumas ações preditivas como, por exemplo, a substituição do óleo. A análise realizada pelo SIMPel superou a do especialista em função da qualificação dos contaminantes ser feita de modo gradativo por meio da modelagem Fuzzy.

Nos outros dois casos, embora os diagnósticos preditivos emitidos pelo SIMPel tenham divergido do especialista, os diagnósticos do especialista não geraram, como nos casos anteriores, prejuízos aos equipamentos. Nesses casos, o diagnóstico do SIMPel também foi mais detalhado, considerado o óleo regular em função do contaminante *F*. Entretanto, uma vez que a contaminação evoluiu muito pouco entre os intervalos das análises, o especialista também conseguiu diagnosticar as ações preditivas a serem tomadas antes que o problema se agravasse.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou o SIMPel, um sistema inteligente híbrido projetado para apoiar os especialistas da ALL na tarefa de manutenção preditiva em equipamentos lubrificados. O SIMPel informa a ação preditiva a ser realizada a fim de melhorar a disponibilidade dos equipamentos sem sobrecarregar a equipe técnica.

O SIMPel é composto por dois módulos inteligentes. O módulo Fuzzy é responsável por classificar o óleo e identificar os contaminantes que contribuíram para a classificação. O módulo Especialista é responsável por obter um diagnóstico preditivo de manutenção com base nos resultados obtidos pelo módulo Fuzzy e informações históricas. Os módulos foram projetados de modo a se complementarem, permitindo que o conhecimento do domínio seja facilmente ampliado e ajustado a novas situações. Se o SIMPel tivesse sido implementado apenas com a técnica especialista, a base de regras seria muito maior e as regras seriam muito mais específicas, dificultando a manutenção do conhecimento. Nesse caso, o conhecimento referente aos limites de contaminação associados a cada equipamento teria de ser codificado de modo preciso ou o usuário teria de informar, a priori, a qualificação de cada contaminante. Por outro lado, uma implementação totalmente baseada na teoria de conjuntos fuzzy não seria adequada, uma vez que os dados históricos não necessitam de tratamento linguístico. Além disso, em função da integração, quando novos equipamentos são inseridos no SIMPel, o módulo Fuzzy permanece inalterado, sendo necessário em alguns casos (dependendo do modelo) apenas a inserção de novos conhecimentos no módulo Especialista e a especificação de conjuntos fuzzy relacionados às variáveis de entrada.

O SIMPel apresentou um excelente desempenho durante os testes realizados, diagnosticando inclusive situações que antes não eram notadas pelo especialista. O SIMPel encontra-se em uso e em estudo para ser integrado ao SAP da empresa. Caso essa integração ocorra é provável que parte das informações fornecidas pelo usuário ao módulo Especialista passem a ser automáticas, uma vez que o SAP possui uma base de dados de manutenção integrada.

Como trabalho futuro, pretende-se adicionar ao SIMPel a funcionalidade de

identificação dos padrões de desgaste do óleo. Desse modo, o SIMPel poderá diagnosticar problemas que possam a vir ocorrer antes que a análise de óleo seja realizada. Para tanto, estuda-se o uso de técnicas de aprendizado de máquina.

6. Agradecimento

O segundo autor agradece o apoio financeiro recebido da Fundação para o Desenvolvimento da Unesp (FUNDUNESP).

References

- Berkan, R. C. and Trubatch, S. L. (1997). *Fuzzy Systems Design Principles: Building Fuzzy If-Then Rule Bases*. Wiley-IEEE Press.
- Bittencourt, G. (2001). *Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias*. UFSC, 2 edition.
- Forgy, C. L. (1982). Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. *Artificial Intelligence*, 19(1):17–37.
- Giarratano, J. C. and Riley, G. D. (2004). *Expert Systems: Principles and Programming*. Course Technology, 4 edition.
- Kreyn, A., Turner, J., and Toms, A. M. (2007). Fuel and water diagnostic enhancements at BNSF railway. In *STLE'07: Society of Tribologists and Lubrication Engineers; Condition Monitoring/Predictive Maintenance*. STLE. 3p.
- Macián, V., Tormos, B., Sala, A., and Ramirez, J. (2006). Fuzzy logic-based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 48(8):462–469.
- Mamdani, E. H. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *Transactions on Computers*, 26(12):1182–1191.
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann, 2 edition.
- Negnevitsky, M. (2005). *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison Wesley, 2 edition.
- Sala, A., Tormos, B., Macián, V., and Royo, E. (2007). Fuzzy diagnosis module based on interval fuzzy logic: Oil analysis application. In *Informatics in Control, Automation and Robotics II*, pages 43–50. Springer Netherlands.
- Toms, A. and Toms, L. (2010). Oil analysis and condition monitoring. In Mortier, R. M., Fox, M. F., and Orszulik, S. T., editors, *Chemistry and Technology of Lubricants*, chapter 16, pages 459–495. Springer, 3 edition.
- Toms, L. A. (1996). Expert systems: A decade of use for used-oil data interpretation. In *Proc. Technology Showcase: Integrated Monitoring, Diagnostics and Failure Prevention*, pages 65–72.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353.