

Modelagem Relacional de Regras para Sistemas Especialistas

Arthur F. Forreux¹, Bruno N. Gomes¹, Carlos A. Silva¹, Daniel B. Conrado¹,
Diego O. Miranda¹, Geraldo A. M. Batista², Victor F. Magalhães

¹Instituto Federal de Minas Gerais, campus Sabará (IFMG)
Sabará, MG – Brasil

²Pesquisador independente
CEP 30421-028 – Belo Horizonte, MG – Brasil

{arthurffoureaux,victorfernandesmagalhaes}@gmail.com

{carlos.silva,bruno.nonato,daniel.conrado,diego.miranda}@ifmg.edu.br
geraldobranches@gmail.com

Abstract. *This paper presents the development of an expert system (SE) for the predictive and prescriptive maintenance of robust equipment through the interpretation of lubricant oil analyses. The ES is structured as a domain-specific relational model, providing expressiveness and maintainability. SEs remain a relevant option for automating processes, especially when the domain is critical and requires precision. The relational modeling adopted guarantees a more structured and adaptable process, making the system applicable to different contexts involving rules based on limits.*

Resumo. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema especialista (SE) voltado para a manutenção preditiva e prescritiva de equipamentos robustos por meio da interpretação de análises de óleos lubrificantes. O SE é estruturado como um modelo relacional específico de domínio, proporcionando expressividade e manutenibilidade. SEs continuam uma opção relevante de automatização de processos principalmente quando o domínio é crítico e requer precisão. A modelagem relacional adotada garante um processo mais estruturado e adaptável, tornando o sistema aplicável a diferentes contextos que envolvem regras baseadas em limites.*

1. Introdução

Sistemas especialistas (SE) constituem um ramo da Inteligência Artificial, tendo sido desenvolvidos por volta da década de 1960. Segundo [Liao 2005], a ideia básica de um SE é a transferência de uma vasta quantidade de conhecimento a respeito de um domínio específico, de um ser humano para um computador por meio de regras. O sistema, portanto, é capaz de receber uma entrada prevista e retornar um resultado de acordo com as regras que a atende.

Em domínios críticos, como a manutenção de equipamentos industriais abordada neste artigo, essas regras representam condições frequentemente complexas e carregadas de restrições detalhadas, associadas a limites de valores predefinidos pelas regras de negócio. Isso faz com que a construção de um SE a partir de um framework genérico (e.g. CLIPS¹ ou Drools) torne-se um desafio.

¹CLIPS: <https://www.clipsrules.net/>, Drools: <https://www.drools.org/>

A gestão de fluidos por meio da análise de óleos desempenha um papel fundamental na manutenção preditiva de equipamentos [Whitby 2021], permitindo a detecção precoce de falhas e a adoção de medidas corretivas antes que danos significativos ocorram. Mesmo com a adoção crescente de técnicas de Aprendizado de Máquina, os SEs continuam relevantes por pelo menos dois motivos: quando não há dados suficientes; e quando o domínio requer elevado grau de precisão. Nesse contexto, SEs surgem como uma solução eficiente para automatizar a interpretação de dados provenientes das análises de óleos, proporcionando diagnósticos mais rápidos e precisos.

O estudo de [Ebersbach and Peng 2008] é um exemplo de aplicação de SE no domínio de manutenção. O autor apresenta o VES (*Vibration Expert System*), um SE para análise de vibração em máquinas rotativas. O VES automatiza a interpretação dos dados de vibração, permitindo que técnicos menos experientes diagnostiquem falhas que, tradicionalmente, exigiriam a expertise de especialistas.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um SE cuja arquitetura é moldada por um domínio real específico; em particular, para uma empresa consolidada do ramo. A organização das regras é projetada em um modelo relacional, aumentando a flexibilidade e manutenibilidade. O SE foi desenvolvido para interpretar análises de óleos lubrificantes de equipamentos, em que as regras estabelecidas culminam em um laudo contendo modos de falha e prescrição de recomendações para manutenção, contribuindo para o aumento da confiabilidade dos equipamentos monitorados.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta o tema da análise de óleos lubrificantes enquanto estudo de caso deste trabalho; na seção 3, é detalhada a construção do sistema especialista, com foco na modelagem relacional adotada para estruturar as regras e os limites do sistema; e, por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2. Estudo de caso: análise de amostras de óleos lubrificantes

A Manutenção Preditiva (MP) voltada para a confiabilidade de máquinas é um paradigma essencial na gestão de ativos, como equipamentos e frotas, nos setores de indústria, aviação, transportes etc. Caracteriza-se pela antecipação e prevenção de falhas como estratégias para otimizar o ciclo de vida dos equipamentos. Sua aplicação tem se consolidado como uma ferramenta amplamente adotada por empresas em busca de vantagem competitiva. Diferentemente da manutenção preventiva, que se baseia em intervenções programadas conforme a expectativa de vida útil de um determinado produto, a MP utiliza dados em tempo real e técnicas de monitoramento para identificar potenciais falhas antes que essas comprometam o desempenho do equipamento. Para minimizar os riscos de falhas, as indústrias frequentemente recorrem à abordagem FMEA—Análise de Modo e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*).

FMEA é um método sistemático de identificação e prevenção de falhas em produtos ou processos antes que eles ocorram [Mikulak et al. 2008]. Nessa abordagem, as falhas estão associadas a modos de falha os quais descrevem os fatores responsáveis por sua ocorrência e a relação com os componentes e carregam consigo um determinado grau de gravidade.

À luz desse contexto, o método, portanto, mostra uma abordagem relevante para gestão de ativos. A análise de óleos lubrificantes desempenha um papel estratégico em

empresas que operam com equipamentos robustos, como aqueles presentes nos setores de mineração, aviação, construção, transporte pesado, indústria e transformadores. A aplicação do FMEA, neste caso, permite uma abordagem sistemática para identificar e mitigar possíveis falhas em equipamentos industriais uma vez que esses costumam operar continuamente por longas horas e em ambientes adversos.

Esses equipamentos, fundamentais para a operação contínua e eficiente, são compostos por diversos compartimentos, os quais incluem motor, sistema de transmissão, sistema hidráulico, diferencial etc, cada um desempenhando funções específicas na estrutura mecânica. Frequentemente, esses compartimentos estão sujeitos a condições severas de uso, o que acelera o desgaste de seus componentes, podendo gerar grandes prejuízos financeiros caso não sejam monitorados adequadamente. Segundo [Sreten 2012], a função básica dos lubrificantes é reduzir o atrito evitando o desgaste excessivo de superfícies sujeitas a um movimento contínuo. Nesse sentido, o monitoramento das propriedades físico-químicas, dos contaminantes, dos aditivos e das partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante permite identificar precocemente alterações no desempenho dos compartimentos, possibilitando a execução de manutenções preditivas e a redução de custos operacionais.

Para a análise, inicialmente realiza-se a coleta de uma amostra de óleo de um compartimento em operação. Em seguida, a amostra é submetida a uma série de ensaios laboratoriais que permitem avaliar seu estado. Como descrito em [Severino et al.], a análise é geralmente categorizada em diferentes tipos, entre os quais se destacam: Análise de desgaste, que avalia a presença de elementos indicativos de desgaste no compartimento; Análise físico-química, que determina a qualidade do óleo lubrificante; e Análise de contaminação, que identifica a presença de substâncias externas ou produtos de reações químicas que comprometem a integridade do lubrificante.

Os ensaios incluem espectrometria — que monitora a concentração de elementos químicos comuns a esse contexto, como ferro, cobre, alumínio, entre outros, medida em Partes por Milhão (ppm) –, ferrografia – empregada para determinar o grau de concentração, os modos e os tipos de partículas de desgaste presentes nas máquinas –, e filtragem por membrana, que possibilita a contagem de partículas de desgaste em diferentes tamanhos, expressos em micrômetros. Além dessas técnicas, propriedades como viscosidade, ponto de fulgor e acidez também são relevantes para a avaliação detalhada do óleo lubrificante. Esses aspectos são detalhados em [Kimura 2010].

Os resultados das análises, quando combinados, permitem determinar os modos de falha, que por sua vez, possibilita realizar uma manutenção prescritiva, em que recomenda-se ações para o planejamento de manutenção, podendo até indicar p. ex. o mau uso do equipamento por parte do operador. Isso ajuda a tomada de decisão nas empresas, aumentando a longevidade de seus equipamentos, e por conseguinte, a diminuição de custos com sua manutenção.

3. Modelo Relacional de Regras

Neste trabalho, foi desenvolvido um SE com base no contexto apresentado na seção 2 e nos tipos de regras inerentes a ele. Tal sistema consiste em um processador de regras que retorna resultados tendo como estrutura os registros de um banco de dados relacional, os quais definem não só as faixas de valores como as próprias regras do domínio.

A arquitetura do sistema transfere boa parte da lógica do encadeamento de regras para o banco de dados, sendo possível, portanto, alterar, adicionar ou remover regras sem que o código do processador de regras seja mudado. A Figura 1 representa o diagrama entidade-relacionamento (DER) simplificado do modelo, cujo detalhamento é descrito nos parágrafos subsequentes.

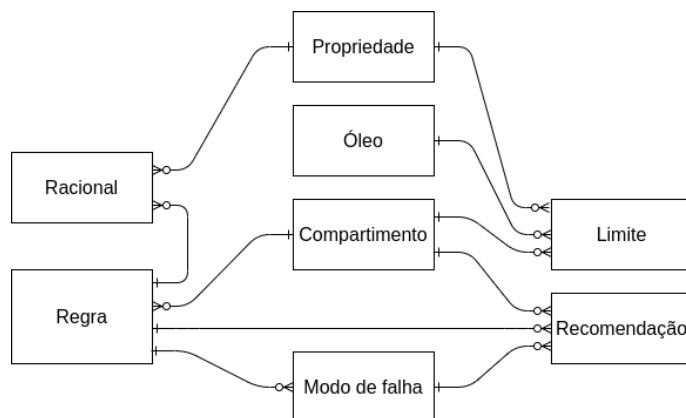


Figura 1. Diagrama Entidade-Relacional do modelo

Limites O SE construído tem como base a estipulação de limites de valores para as propriedades dos ensaios. Tais limites definem uma faixa de normalidade daquela propriedade para o compartimento ou óleo em análise. Dessa maneira, os valores de ensaios que estão entre um dado limite inferior e superior são considerados normais. Caso seja estipulado apenas um desses limites, entende-se que a faixa de normalidade vai do limite existente até o infinito, positivo ou negativo, se preenchido o limite inferior ou superior, respectivamente.

Os limites são definidos pela tabela **limite**, que possui colunas para especificar a propriedade de que se trata, os valores dos limites superior e inferior, bem como do compartimento ou do tipo de óleo ao qual o limite se refere. Para ilustrar o conceito mencionado, considere a análise do óleo de um compartimento do tipo motor a combustão em que a fabricante do motor especificou que a faixa padrão da propriedade *ponto de fulgor* varia entre 190°C e 208°C, e que a faixa de normalidade para a propriedade *TBN* situa-se entre 3.5 e 10. Dessa forma, seriam necessários os seguintes registros expressos pelas tabelas 1, 2 e 3. Na tabela 3, nota-se que os limites foram definidos como específicos do compartimento e não do tipo de óleo, pois o mesmo óleo pode ter limites distintos a depender do tipo de compartimento.

id	nome
1	motor a combustão

Tabela 1. Exemplo da tabela compartimento

id	nome
1	TBN
2	ponto de fulgor

Tabela 2. Exemplo da tabela propriedade

id	propriedade_id	compartimento_id	oleo_id	limite_inf	limite_sup
1	1	1	null	3.5	10
2	2	1	null	190	208

Tabela 3. Exemplo da tabela limite

Regras e racionais Uma regra descreve uma alteração específica que pode ocorrer com a amostra. As alterações podem ter diferentes níveis de severidade. Elas trazem consigo um código identificador, a avaliação de severidade – que pode ser p. ex. normal, anormal ou crítica – e opcionalmente o tipo de compartimento, que é usado para determinar quando uma regra se aplica exclusivamente a um compartimento específico.

A cada regra, são atribuídos um ou mais *racionais*, os quais são restrições que precisam ser atendidas para que a regra seja considerada verdadeira. Para isso, todos os racionais atrelados a ela precisam ser satisfeitos. A Tabela 4 mostra a estrutura do Racional.

Coluna	Tipo de Dado
id	INT (Chave primária)
propriedade_id	INT (Chave estrangeira)
regra_id	INT (Chave estrangeira)
grau_min	DOUBLE
grau_max	BOOLEAN
maior_que	BOOLEAN
menor_que	BOOLEAN
entre	BOOLEAN
valor_exato	VARCHAR

Tabela 4. Estrutura da tabela racional

Os racionais possuem a informação da propriedade levada em consideração e da regra atrelada a ele. As colunas *maior_que*, *menor_que*, *entre*, *grau_min* e *grau_max* levam em consideração os limites estabelecidos na tabela **limite**. Combinações dessas com o campo *valor_exato* podem assumir diferentes significados na aplicação. A seguir, está a explicação do significado gerado pela combinação dessas colunas:

- **maior_que:** o valor da entrada deve estar acima do limite superior;
- **menor_que:** o valor da entrada deve estar abaixo do limite inferior;
- **entre:** o valor da entrada deve estar entre os limites inferior e superior, inclusive.
- **maior_que + menor_que:** o valor da entrada deve estar acima do limite superior ou abaixo do inferior;
- **entre + menor_que:** o valor da entrada deve estar abaixo do limite superior;
- **entre + maior_que:** o valor da entrada deve estar acima do limite inferior;
- **maior_que + entre + menor_que:** qualquer valor de entrada é satisfeito;
- **valor_exato:** considera o valor definido neste campo. É utilizado para propriedades cujos limites não se aplicam. Admite também valores de texto.
- **valor_exato + maior_que:** o valor de entrada deve ser maior que o valor definido no **valor_exato**.
- **valor_exato + menor_que:** o valor de entrada deve ser menor que o valor definido no **valor_exato**.

Para as regras em que os valores devem estar dentro de uma faixa específica acima, abaixo, ou entre os limites, utiliza-se o mecanismo de *grau*. O grau expressa a proximidade do valor do ensaio em relação aos limites. Por exemplo, quando a concentração de ferro ultrapassa em mais de duas vezes o limite superior estabelecido, isso pode indicar um modo de falha mais específico. O grau de um ensaio é obtido de diferentes formas a depender do contexto do racional. Quando o atributo **maior_que** é verdadeiro, o grau é o quociente entre o valor do ensaio e o valor do limite superior. Por analogia, quando o atributo **menor_que** está ativo, o denominador passa a ser o limite inferior. Já quando o atributo *entre* está em vigor, o grau é obtido através da seguinte equação:

$$\text{Grau} = \frac{\text{valor} - \text{limite_inferior}}{\text{limite_superior} - \text{limite_inferior}}$$

Dessa maneira, o grau assume o significado da proximidade entre o valor do ensaio e os limites. A título de exemplo, considere uma regra que seja válida apenas quando uma propriedade qualquer *p* tenha um valor de entrada entre duas e quatro vezes o seu limite superior. Nesse caso, a coluna *grau_min* teria o valor 2 e a coluna *grau_max* o valor 4, ambas acompanhadas pelo valor verdadeiro na coluna *maior_que*.

Modos de falha e Recomendações Os modos de falha estão diretamente associados às regras armazenadas na base de dados. Cada regra resulta em um ou mais modos de falha. É importante ressaltar que diferentes regras podem resultar no mesmo modo de falha. Isso ocorre porque múltiplas condições podem levar a uma mesma consequência indesejada, evidenciando os padrões recorrentes de falhas no sistema.

Seguindo essa lógica, as recomendações podem ser classificadas de duas formas. Algumas recomendações são associadas apenas a um modo de falha, configurando-se como recomendações gerais, pois não dependem da regra específica que originou o problema. Por outro lado, existem recomendações mais específicas, que são vinculadas tanto a um modo de falha quanto à regra que o originou. Essas recomendações detalhadas levam em consideração tanto o evento desencadeador quanto o efeito resultante.

Para ilustrar o conceito, considere as tabelas 5, 6 e 7, que representam registros armazenados das tabelas **regra**, **modo de falha** e **recomendação**, respectivamente.

id	codigo	comp_id	avaliacao
1	R-100	null	Anormal
2	R-101	null	Anormal
3	R-200	1	Crítico

Tabela 5. Exemplo da tabela regra

id	codigo	regra_id	comp_id
1	M-100	1	null
2	M-101	1	null
3	M-100	2	null
4	M-101	2	2
5	M-102	2	3
6	M-200	3	null

Tabela 6. Exemplo da tabela modo de falha

Na tabela 5, observa-se que as regras de ID 1 e 2 não possuem restrições por compartimento, enquanto a de ID 3 apresenta restrição para o compartimento identificado pelo ID 1. Na tabela de modos de falha (Tabela 6), nota-se que a regra ID 1 está associada

id	codigo	regra_id	codigo_modo_de_falha	compartimento_id
1	A-100	null	M-100	null
2	A-101	1	M-101	null
3	A-200	3	M-200	1
4	A-201	3	M-200	2
5	A-202	3	M-200	3

Tabela 7. Exemplo da tabela recomendacao

a dois modos de falha (IDs 1 e 2). A regra ID 2, por sua vez, está vinculada a três modos de falha distintos (IDs 3, 4 e 5). Os modos de falha que não possuem referência para compartimento (IDs 1, 2, 3 e 6) são dados independente do compartimento amostrado, enquanto que os que possuem referência serão retornados apenas quando a entrada refere-se ao compartimento identificado.

Na tabela de recomendações (Tabela 7), nota-se que a recomendação de código A-100 (ID 1) é aplicável a todas as regras que geram o modo de falha identificado como M-100. Já a recomendação A-101 (ID 2) é atribuída apenas quando há um modo de falha M-101 e cuja origem é a regra de ID 1. Finalmente, a regra de ID 3 possui três recomendações distintas, A-200, A-201 e A-202 (IDs 3, 4 e 5), que variam conforme o compartimento amostrado.

Pseudocódigo O algoritmo 1 representa o pseudocódigo do interpretador do sistema especialista. Em conjunto com o modelo relacional, ele compõe a base funcional do sistema, garantindo sua operacionalidade completa. O algoritmo recebe como entrada as informações da amostra juntamente com os resultados dos ensaios. A partir da entrada, são carregadas regras e os limites aplicáveis ao compartimento analisado. Cada regra, ao ser avaliada, pode produzir modos de falha e recomendações. Ao final, as regras consideradas verdadeiras, juntamente com os modos de falha e as recomendações, são retornados, os quais são utilizadas para montar o laudo de análise.

Algoritmo 1 Pseudocódigo do modelo

```

function REALIZARANALISE(ensaios, compartimento, oleo)
  mf ← [], re ← [], ra ← []           ▷ Modos de falha, Recomendações e Regras atendidas
  OBTERREGRASPORCOMPARTIMENTO(compartimento)
  limites ← OBTERLIMITESPORCOMPARTIMENTO(compartimento)
  limites ← limites ∪ OBTERLIMITESPOROLEO(oleo)
  for all regra ∈ regrasVigentes do
    racionais ← OBTERRACIONAISDAREGRA(regra)
    AVALIARREGRA(e, limites, racionais)
    if regra avaliada verdadeira then
      ra ← ra ∪ regra
      mf ← mf ∪ OBTERMODODEFALHA(regra, compartimento)
      re ← re ∪ OBTERRECOMENDACOES(regra, mf, compartimento)
    end if
  end for
  return ra, mf, re
end function

```

4. Resultados e Discussão

O SE desenvolvido com ênfase no contexto da análise de óleo se mostrou bastante flexível para tratar de regras restritas ao domínio do problema. No decorrer da sua construção, surgiram regras específicas que levaram à criação de novas restrições para modelagem do problema. O grau é um exemplo de um artifício que teve de ser implementado para contemplar regras que tinham como restrição não só o limite mas também uma faixa de valores específica além do limite.

Ao transferir a maior parte da lógica das regras para a modelagem relacional, em vez de incorporá-las diretamente no código-fonte do sistema, tornou-se possível realizar a inserção, modificação e remoção de regras um processo de maneira mais eficiente e flexível. Essa abordagem elimina a necessidade de alterações no código, evitando a criação de novas versões do sistema e, conseqüentemente, a necessidade de um novo *redeploy* sempre que ajustes nas regras forem necessários.

O trabalho foi desenvolvido sob a perspectiva da análise de óleos lubrificantes, o que moldou boa parte da arquitetura do sistema e a forma pelo qual as soluções foram pensadas. Apesar disso, tal modelagem pode ser aplicada em vários domínios semelhantes em que envolva a emissão de laudo de análise de amostras, como análises de vibração, análises clínicas ou análises limnológicas.

5. Considerações Finais

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um SE para a análise de óleos lubrificantes, estruturado sobre um modelo relacional que permite a definição de regras associadas a modos de falha e recomendações. A abordagem adotada buscou garantir flexibilidade e escalabilidade ao sistema, permitindo a manipulação dinâmica das regras sem a necessidade de alterações no código-fonte e reimplantação do sistema. Como trabalhos futuros, pode ser criada uma interface gráfica para facilitar a inclusão e alteração de regras, limites e outros tipos de compartimento.

Referências

- Ebersbach, S. and Peng, Z. (2008). Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring. *Expert systems with applications*, 34(1):291–299.
- Kimura, R. K. (2010). Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante. Dissertação de mestrado.
- Liao, S.-H. (2005). Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004. *Expert systems with applications*, 28(1):93–103.
- Mikulak, R. J., McDermott, R., and Beauregard, M. (2008). *The basics of FMEA*. Productivity Press.
- Severino, J. B. F. P., Santos, M. L. M., Silva, M. F. F. S., and Ribeiro, J. L. S. Artigo científico: Análise de óleo lubrificante aplicada na manutenção preditiva nos equipamentos do segmento de construção civil: Ferrografia analítica.
- Sreten, P. R. (2012). Importance of lubricant analysis. *Vojnotehnički glasnik*, 60(2):156–181.
- Whitby, R. D. (2021). *Lubricant analysis and condition monitoring*. CRC Press.