



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

*Computação evolucionária Aplicada ao
Diagnóstico de Falhas Incipientes em
Transformadores de Potência
Utilizando Dados de Cromatografia*

*Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da UFMG como parte
dos requisitos exigidos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.*

**Área de Concentração: SISTEMAS DE
COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES**

Aluno: Sidney Lima de Senna

Orientador: Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos

Belo Horizonte, Setembro de 2010.



Laboratório de Computação Evolucionária
Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
Fone: (31) 3409 34 26
Contato: joao@cpdee.ufmg.br

Agradecimentos

Deus: Nosso Pai, por iluminar meu caminho; mesmo quando parecia que eu estava só, Ele Sempre estava ao meu lado.

Família: Em especial à minha mãe, dona Neuri Lima de Senna e minhas irmãs Cira e Célia que sempre acreditaram no meu esforço.

Amigos: Todos os que compartilharam comigo, de forma direta ou indireta, este período de muito trabalho, alegrias e tristezas.

Agradeço ao Professor Dr. João Antônio de Vasconcelos pelo apoio incondicional, e pelas lições aprendidas. Muito obrigado!

- O Reino do Céu é como um tesouro escondido num campo, que certo homem acha e esconde de novo. Fica tão feliz, que vende tudo o que tem, e depois volta, e compra o campo.

- O Reino do Céu é também como um comerciante que anda procurando pérolas finas. Quando encontra uma pérola que é mesmo de grande valor, ele vai, vende tudo o que tem e compra a pérola.

Mt 13,44-46



Laboratório de Computação Evolucionária
Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
Fone: (31) 3409 34 26
Contato: joao@cpdee.ufmg.br

Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introdução..... | 13 |
| 1.1 | Motivação | 13 |
| 1.2 | Objetivos | 14 |
| 1.3 | Escopo..... | 14 |
| 1.4 | Contribuições da Dissertação..... | 15 |
| 1.5 | Estrutura do Trabalho | 15 |
| 2. | Diagnóstico de Falhas Utilizando Dados de Cromatografia: Visão Geral..... | 16 |
| 2.1 | Introdução..... | 16 |
| 2.2 | Falhas em Transformadores | 16 |
| 2.2.1 | Sistema de Isolamento Sólida..... | 16 |
| 2.2.2 | Sistema de Isolamento Líquida..... | 17 |
| 2.2.3 | Envelhecimento da Isolamento e os Problemas no Transformador | 19 |
| 2.3 | Manutenção Preditiva em Transformadores..... | 23 |
| 2.3.1 | Análise Termográfica..... | 23 |
| 2.3.2 | Análise Físico-Química..... | 24 |
| 2.3.3 | Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos no Óleo | 24 |
| 2.3.4 | Análise dos Furfuraldeídos no Óleo e o Grau de Polimerização do Papel Isolante | 26 |
| 2.3.5 | Limitações | 27 |
| 2.4 | Métodos Clássicos de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas Incipientes | 28 |
| 2.4.1 | Taxa de Evolução dos Gases | 28 |
| 2.4.2 | Método de Duval..... | 28 |
| 2.4.3 | Método das Razões de Dörnenburg | 30 |
| 2.4.4 | Método das Razões de Rogers | 30 |
| 2.4.5 | Método Proposto na NBR 7274..... | 31 |
| 2.5 | Métodos Não-Clássicos para diagnóstico de falhas..... | 31 |
| 2.5.1 | Programação Genética (PG) | 32 |
| 2.5.2 | Árvore de Decisão | 37 |
| 2.6 | Conclusão..... | 45 |
| 3. | MINERA: Framework para Descoberta de Regras em Base de Dados..... | 47 |
| 3.1 | Trabalhos Relacionados..... | 47 |
| 3.2 | MINERA: Framework para Descoberta de Regras em Base de Dados | 49 |
| 3.2.1 | Arquitetura do Framework..... | 50 |
| 3.2.2 | Representação do indivíduo..... | 52 |
| 3.3 | MINERA: Validação Inicial: Base de Dados de Hepatite..... | 53 |
| 3.3.1 | Base de Dados | 54 |
| 3.3.2 | Parâmetros da Simulação..... | 55 |
| 3.3.3 | Resultados..... | 56 |



| | | |
|-------|--|----|
| 3.4 | Conclusão..... | 57 |
| 4. | Resultados Utilizando o Framework MINERA | 59 |
| 4.1 | Modificações no algoritmo..... | 59 |
| 4.1.1 | Cálculo da "Fitness" | 59 |
| 4.1.2 | Suporte a Processamento Multi-Core | 60 |
| 4.1.3 | CrITÉrios de Parada | 62 |
| 4.2 | Descrição da Base de Dados | 62 |
| 4.3 | Resultados das Simulações..... | 64 |
| 4.4 | Conclusão | 95 |
| 5. | Considerações Finais | 96 |
| 5.1 | Conclusões | 96 |
| 5.2 | Propostas para Trabalhos Futuros..... | 96 |
| 6. | Referências Bibliográficas | 98 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Composição química da celulose. Fonte: [31] | 17 |
| Figura 3: Curva da Banheira Generalizada. Fonte: [30] | 21 |
| Figura 4: Transformadores com comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por local onde ocorre falha. Fonte: [30] | 21 |
| Figura 5: Transformadores com comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por origem. Fonte: [30] | 21 |
| Figura 6: Transformadores sem comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por local onde ocorre falha. Fonte: [30] | 22 |
| Figura 7: Principais causas de falhas ocorridas em transformadores. Fonte: [30] | 22 |
| Figura 8: Câmera utilizada em termovisão. Fonte: [30] | 23 |
| Figura 9: Baixo nível de óleo isolante, ocasionando sobreaquecimento. Fonte: [30] | 23 |
| Figura 10: Coleta de óleo mineral para análise. Fonte: [30] | 24 |
| Figura 11: Correlação entre teor furfural e grau de polimerização de acordo com Burton | 27 |
| Figura 12: Diagrama ternário IEC (Duval) | 29 |
| Figura 13: Expressão booleana em forma normal disjuntiva | 34 |
| Figura 14: Dois indivíduos selecionados para cruzamento. Fonte: [28] | 36 |
| Figura 15: As partes selecionadas aleatoriamente. Fonte: [28] | 36 |
| Figura 16: Dois novos indivíduos criados. Fonte: [28] | 36 |
| Figura 17: Fluxograma do algoritmo de Programação Genética | 37 |
| Figura 18: Classificação: mapeamento de um conjunto de atributos x em classe rotulada y [47]. | 38 |
| Figura 19: Construção de um modelo de classificação [47]. | 39 |
| Figura 20: Árvore de decisão para o problema de classificação de mamíferos [47]. | 40 |
| Figura 21: Classes do pacote com.minera.tree | 51 |
| Figura 22: Classes e interfaces do pacote com.minera.operators | 51 |
| Figura 23: Classes e interfaces do pacote com.minera.factory | 52 |
| Figura 24: Classes e interfaces do pacote com.minera.entry | 52 |
| Figura 25: Representação de um indivíduo no framework MINERA. | 53 |
| Figura 26: Exemplo de um indivíduo no framework MINERA. | 53 |
| Figura 27: Exemplo de um indivíduo na Árvore de Decisão tradicional. | 53 |
| Figura 28: Transformação dos dados utilizando Kettle. | 54 |
| Figura 29: Estrutura original da tabela com dados de hepatite. | 55 |
| Figura 30: Comando SQL para contabilizar a quantidade de registros para cada classe. | 55 |
| Figura 31: Hepatite - Melhor indivíduo gerado para classe 1. | 56 |
| Figura 32: Execução do comando SQL para indivíduo classificador da classe 1. | 57 |
| Figura 33: Parâmetros de execução das simulações. | 65 |
| Figura 34: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1. | 67 |
| Figura 35: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3. | 71 |
| Figura 36: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1. | 72 |
| Figura 37: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3. | 73 |
| Figura 38: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1. | 80 |
| Figura 39: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3. | 90 |
| Figura 40: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1. | 92 |



Tabela de Nomenclaturas

| Nomenclatura | Descrição |
|------------------------------------|--|
| Análise de Gases Dissolvidos (DGA) | Técnica amplamente utilizada para controlar falhas em serviço de equipamentos elétricos isolados a óleo mineral [59]. |
| Algoritmo | Um algoritmo é um conjunto de passos que definem a forma como uma tarefa é executada. Mais precisamente, um algoritmo é um conjunto ordenado e não-ambíguo de passos executáveis que definem uma atividade finita [60]. |
| Algoritmos Evolucionários | São algoritmos que utilizam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas. Apesar de haver uma grande variedade de modelos computacionais propostos, todos eles têm em comum o conceito de simulação da evolução das espécies através de seleção, mutação e reprodução, processos estes que dependem do “desempenho” dos indivíduos desta espécie dentro do “ambiente” [61]. |
| Arco Elétrico | O arco elétrico pode se manifestar em descargas nos meios gasosos, sendo encontrado em aplicações industriais e residenciais, como fornos a arco e lâmpadas de descargas em gases [62]. |
| Árvore de Decisão | Derivam das Tabelas de Decisão; é como se fossem Tabelas de Decisão representadas sob forma de uma árvore. Na prática uma Árvore de Decisão é a representação gráfica de uma Tabela de Decisão numa forma dinâmica de direcionar as ações [63]. Uma Árvore de Decisão (AD) é uma estrutura de dados definida recursivamente como [65]: - Um nó folha que corresponde a uma classe ou - um nó de decisão que contém um teste sobre algum atributo. Para cada resultado do teste existe uma aresta para uma subárvore. Cada subárvore tem a mesma estrutura que a árvore. |
| Cromatografia | Técnicas cromatográficas constituem processos de separação de substâncias orgânicas. Em um processo cromatográfico, as substâncias a serem separadas são carreadas por uma fase que se move (fase móvel) ao longo de uma outra fase estacionária (leito cromatográfico). Possui diversas subdivisões, sobretudo, a subdivisão baseada no estado de agregação da fase móvel. Nesta subdivisão participam a cromatografia gasosa ou cromatografia a gás (GC) e a cromatografia líquida ou cromatografia a líquido (LC) [64]. |



| | |
|--------------------------|---|
| Computação evolucionária | Trata de sistemas para resolução de problemas que utilizam modelos computacionais baseados na Teoria da Evolução Natural (2005 Carvalho, Braga, Ludemir apud Back 1996). Back (1996) propõe o agrupamento dos sistemas de Computação Evolucionária em três grandes áreas: Algoritmos Genéticos, Estratégias de Evolução e Programação Genética [65]. |
| Corona | Corona é um fenômeno pelo qual o ar ao redor do condutor é ionizado. Considere uma fase única de dois fios do sistema cujo espaçamento é grande em relação ao diâmetro dos fios. Quando uma baixa tensão alternada é aplicada entre dois condutores não há nenhuma mudança na condição do ar ao redor. Se a tensão aplicada é aumentada gradualmente, vai resultar em um aumento gradativo do gradiente de tensão. No momento em que atinge o valor máximo, ou seja, cerca de 30 kV / cm (pico) ou 21,1 kV / cm (r.m.s.), o ar ao redor do condutor passa a conduzir com um som de assobio. No escuro, um brilho violeta ocorre em volta do condutor e o ozônio é produzido, e esse efeito é chamado corona [66]. |
| Descargas Parciais | Descargas parciais são sucessões de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes na ordem de nano-segundo, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade e um meio isolante, pelo efeito de ionização em cavidades gasosas no interior dos materiais isolantes sólidos e líquidos [67]. |
| Design Pattern | Os padrões de projeto de software ou padrões de desenho de software (termo original em inglês: Design Patterns), são soluções de objetos e classes comunicantes que precisam ser personalizadas para resolver um problema geral de projeto num contexto particular. Um padrão de projetos nomeia, abstrai e identifica os aspectos-chave de uma estrutura de projeto comum para torná-la útil para criação de um projeto orientado a objetos reutilizável [68]. |
| Entropia | A Entropia estatística é a medida da variação ou diversidade na distribuição probabilística de um evento. É zero quando todos os elementos são do mesmo tipo e nos demais casos positiva. A medida da entropia estatística é a medida básica da Teoria da Informação [69]. |
| ETL | ETL, do inglês Extract Transform Load (Extração, Transformação e Carga), é um conjunto de processos para transferir dados de sistemas OLTP para Data Warehouse. Atualmente os dados são capturados não apenas de sistemas OLTP, mas de diversas fontes como websites, diversos arquivos textuais como txt, csv, etc (flat files), base de dados de e-mail, planilhas eletrônicas e bases de dados pessoais. O destino desses dados pode ser não apenas <i>data warehouse</i> , mas também <i>data mart</i> , planilhas eletrônicas, entre outros [70]. |
| Fitness | É uma função usada para avaliar um indivíduo. Cada tipo de problema necessita de uma função de avaliação específica [28]. |
| Framework | Em desenvolvimento de software, um framework de software é |



| | |
|------------------------------|---|
| | um projeto reutilizável de um sistema que descreve como este é decomposto em um conjunto de objetos e suas interações. Um Framework descreve o comportamento dos objetos e como esses objetos interagem [54]. |
| Furfuraldeído | Composto furânico produzido pela degradação da glucose que constitui a celulose presente no sistema de isolamento dos transformadores de potência [41]. |
| Falha Incipiente | Indica a situação na qual ainda não há perda de função, mas há indicações ou indícios de que a perda da função total ou parcial poderá ocorrer se não houver manutenção ou reparo [71]. |
| Grau de Polimerização (GP) | É responsável por medir a qualidade da isolamento sólida. O envelhecimento da isolamento sólida indica o envelhecimento do transformador [19]. |
| IDE | IDE, do inglês Integrated Development Environment é um ambiente de desenvolvimento integrado, também conhecido como ambiente de design integrado ou ambiente integrado de depuração. É uma aplicação de software que fornece instalações completas para os programadores de computador para desenvolvimento de software [72]. |
| Inteligência Computacional | Procura desenvolver sistemas que tenham comportamento similar a certos aspectos do comportamento inteligente. Os conceitos de Inteligência Computacional e Inteligência Artificial são equivalentes [61]. |
| Inteligência Artificial (IA) | “Ciência que tenta compreender e emular a inteligência humana como um todo (tanto no comportamento quanto no processo cognitivo)”. De acordo com Boose, “inteligência artificial é um campo de estudo multidisciplinar e interdisciplinar, que se apóia no conhecimento e evolução de outras áreas do conhecimento”. Para Winston, “inteligência artificial é o estudo das idéias que permitem aos computadores simular inteligência” [61]. |
| Java | <p>Java inclui a linguagem de programação Java, a máquina virtual Java (Java Virtual Machine - JVM) e a plataforma Java.</p> <p>A linguagem de programação é a linguagem com a qual os programas Java são construídos (aplicações Java, Applets, Servlets e componentes são escritos).</p> <p>Quando um programa Java é compilado, o código é convertido em “byte codes” que são códigos entendidos pela JVM. A JVM pode ser implementada diretamente no hardware, mas é comumente implementada na forma de software que interpreta e executa os “byte codes”.</p> <p>A plataforma Java é distinta tanto da linguagem de programação quanto da JVM. Consiste no conjunto de classes Java pré-definidas, existentes em cada instalação Java. Estas classes são disponíveis para uso por todos os programas Java. A plataforma Java é algumas vezes referenciada com Java Runtime Environment – JRE ou ainda API Java [73].</p> |



| | |
|-----------------------|--|
| KDD | A sigla do inglês Knowledge Discovery in Data Bases significa o processo de extração de modelos e padrões em grandes bases de dados. KDD é o processo de abstração do modelo em grandes bases de dados e a busca por novos padrões que sejam válidos e não triviais [74]. |
| Sistemas Fuzzy | <p>O termo fuzzy pode ter diversos significados. As tentativas de tradução mais populares para o português na área de engenharia apontam para os termos: nebuloso e difuso.</p> <p>As teorias de conjuntos fuzzy utilizadas para representação e processamento de conhecimento são derivadas da teoria de conjuntos clássica e foi criada para tratar graus de pertinência intermediários entre a pertinência total e a não-pertinência de elementos de um universo de discurso com relação a um dado conjunto [65].</p> |
| Matriz de Confusão | A matriz de confusão de uma hipótese h oferece uma medida efetiva do modelo de classificação, ao mostrar o número de classificações corretas versus as classificações preditas para cada classe sobre um conjunto de exemplos T . os resultados são totalizados em duas dimensões: classes verdadeiras e classes preditas para k classes diferentes [65]. |
| Mineração de Dados | Mineração de Dados, também conhecida pelo termo inglês Data Mining, é o processo de extrair conhecimento grandes quantidades de dados. É uma etapa importante no processo de KDD na qual métodos inteligentes são aplicados com a finalidade de extrair padrões nos dados [48]. |
| Manutenção Corretiva | É realizada quando o equipamento deixa de cumprir sua função principal em virtude de uma falha [30]. |
| Manutenção Preventiva | É realizada de forma programada e considera o envelhecimento do equipamento a partir do tempo de operação [30]. |
| Manutenção Preditiva | <p>No âmbito deste trabalho de mestrado, considera-se o programa de manutenção preditiva baseado em condição de operação do equipamento.</p> <p>Determina o ponto ótimo para executar a manutenção preventiva, isto é, indica o ponto a partir do qual a probabilidade de falha no equipamento assume valores indesejáveis [30].</p> |
| MySQL | O MySQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) de domínio público, sendo atualmente um dos mais populares. Apresenta desempenho, confiabilidade e fácil utilização ¹ . |
| Otimização | Otimização é um tema amplamente utilizado na ciência, engenharia, economia, gestão, indústria e outras áreas. Consiste em selecionar a melhor, entre muitas decisões possíveis, no ambiente real. É realizada por meio de métodos computacionais |

¹ <http://www.mysql.com/why-mysql/> acessado em 12/10/2010.



| | |
|-------------------|--|
| | para encontrar as melhores soluções, explorando as propriedades teóricas e estudando o desempenho computacional dos algoritmos numéricos implementados com base em métodos computacionais [75]. |
| Overfitting | “Ao induzir, a partir dos exemplos disponíveis, é possível que a hipótese seja muito específica para o conjunto de treinamento utilizado. Como o conjunto de treinamento é apenas uma amostra de todos os exemplos do domínio, é possível induzir hipóteses que melhorem seu desempenho no conjunto de treinamento, enquanto pioram o desempenho em exemplos diferentes daqueles pertencentes ao conjunto de treinamento. Nesta situação, o erro (ou outra medida) em um conjunto de teste independente evidencia um desempenho ruim da hipótese. Nesse caso, diz-se que a hipótese ajusta-se em excesso ao conjunto de treinamento ou que houve um overfitting” [65]. |
| PostgreSQL | O PostgreSQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados objeto-relacional (SGBDOR) desenvolvido pelo Departamento de Ciência da Computação da Universidade da Califórnia em Berkeley. O POSTGRES foi pioneiro em vários conceitos que somente se tornaram disponíveis muito mais tarde em alguns sistemas de banco de dados comerciais ² . |
| SQL | Structured Query Language, ou Linguagem de Consulta Estruturada ou SQL, é a língua mais amplamente aplicada para banco de dados relacional. Assim como a matemática é a linguagem da ciência, SQL é a linguagem dos bancos de dados relacionais. SQL permite não apenas gerenciar os dados na base de dados, mas também gerenciar a própria base [76]. |
| Tabela de Decisão | Pode-se entender uma tabela de decisão como sendo um dispositivo prático, na forma de tabela, que contém as condições impostas pelo problema, as regras de decisão e as ações a serem executadas para cada situação. Esse modelo resume o conjunto de condições necessárias para que as devidas ações (instruções) possam ser executadas [63]. |
| Weka | Weka é uma coleção de algoritmos de aprendizado de máquina para tarefas de mineração de dados. Os algoritmos podem ser aplicados diretamente a um conjunto de dados ou chamado a partir do seu próprio código Java. Weka contém ferramentas para os dados de pré-processamento, classificação, regressão, clusterização, regras de associação e visualização. É também ideal para o desenvolvimento de novos modelos de aprendizagem de máquina. Weka é um software de código aberto emitidos sob a GNU General Public License ³ . |

² <http://pgdocptbr.sourceforge.net/pg80/preface.html#INTRO-WHATIS> acessado em 12/10/2010.

³ <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> acessado em 12/10/2010.



Resumo

Em uma subestação elevadora, os transformadores de potência são os equipamentos responsáveis pela elevação dos valores de tensão, com o objetivo de transmitir a energia elétrica em alta tensão com redução das perdas por efeito Joule. Por outro lado, nos centros consumidores, os transformadores das subestações são responsáveis por rebaixar o nível de tensão para permitir a distribuição nos centros urbanos.

Percebe-se, então, a importância desses equipamentos e a necessidade de mantê-los em perfeito funcionamento. Uma falha grave gera um elevado custo de manutenção corretiva, queda nos indicadores de desempenho, além de multas por parte da agência reguladora - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL . Portanto é altamente desejável avaliar a vida útil de um transformador de potência, ou pelo menos identificar as falhas incipientes no transformador antes que ocorra uma falha catastrófica.

O fim da vida útil de um transformador de potência está diretamente relacionado ao fator térmico, isto é, quando ele está em operação o mesmo é submetido a elevadas temperaturas, impactando, de forma negativa, seu sistema de isolamento. O sistema de isolamento do transformador pode ser dividido em sólido (constituídos à base de celulose) e líquido (por meio da imersão do transformador em um tanque preenchido com óleo isolante). Os estresses térmicos e elétricos, sofridos pelo transformador em operação, ocasionam a degradação do papel e do óleo isolante.

Com o envelhecimento do óleo mineral, formam-se gases que são produzidos de forma mais acentuada quando ocorre alguma falha. Para evitar danos aos transformadores, as concessionárias de energia elétrica têm adotado procedimentos de manutenção preventiva, no entanto os custos envolvidos nesse tipo de procedimento podem ser minimizados por meio de manutenções preditivas. A manutenção preditiva pode indicar o melhor momento para a realização da manutenção preventiva, evitando gastos desnecessários.

Esta dissertação trata do desenvolvimento, análise e implementação de uma nova metodologia a qual utiliza um algoritmo evolucionário baseado em Programação Genética para detectar regras em base de dados de transformadores, com a finalidade de predição de falhas incipientes.

Para melhorar a capacidade no diagnóstico de falhas utilizando informações sobre os gases dissolvidos no óleo isolante, foi desenvolvido um framework denominado MINERA para descoberta de regras em base dados. Esta ferramenta emprega um algoritmo de Programação Genética modificado que utiliza conceitos da Teoria da Informação, tais como Entropia e Ganho de Informação. O framework também fornece suporte para tirar máximo proveito da arquitetura de processadores com múltiplos núcleos.

Palavras-chave: Programação Genética, Mineração de Dados, Análise de Gases Dissolvidos, Algoritmos Evolucionários, Transformador.



Abstract

In an electrical substation of hydro-electric power station, power transformers are the equipments responsible for raising the voltage values, with the goal of transmitting electrical energy at high voltages with reduction of losses by Joule effect. On the other hand, at consumer's centers, transformers are responsible for reducing the voltage level to allow distribution in urban centers.

The importance of such equipments is clear. A major fault generates a high cost of corrective maintenance, drop in performance indicators, in addition to fines by the regulatory agency, which in Brazil is called the National Agency of Electric Energy (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL). Therefore it is highly desirable evaluate the lifetime of a power transformer, or at least identify the incipient faults in the transformer before a catastrophic failure occurs.

The life cycle of a power transformer is directly related to the thermal factor, i.e., when in operation it is subjected to high temperatures that impact, in a negative way, their insulation system. The insulation system of the transformer can be divided into solid (made of cellulose-based) and liquid (by immersing the transformer in a tank filled with insulating oil). The thermal and electrical stress, suffered by the power transformer in operation, causes the degradation of both insulating paper and oil.

With the aging of the mineral oil, gases are produced in a more pronounced way when a fault occurs. To prevent damage to transformers, the companies have adopted preventive maintenance procedures, however the costs involved in this kind of procedure can be minimized through predictive maintenance. The predictive maintenance can indicate the best time to perform preventive maintenance, avoiding unnecessary expenses.

This dissertation aims at developing, analyzing and implementing a novel methodology that uses an Evolutionary Algorithm based on Genetic Programming to detect rules from power transformers database to predict incipient faults. The fault diagnosis abilities based on dissolved gas analysis (DGA), is enhanced by developing a framework called MINERA to discovery rules from database. MINERA was developed based on a modified Genetic Programming Algorithm that uses concepts from Information Theory, such as Entropy and Information Gain. This framework also provides support to take full advantage of the architecture of multi-core processors.

Keywords: Genetic Programming, Data Mining, Dissolved Gas Analysis, Evolutionary Algorithms, Power Transformer.



1. Introdução

1.1 Motivação

As tecnologias empregadas no monitoramento de transformadores, que têm sido desenvolvidas nos últimos dez anos ou mais, têm fornecido informações bastante úteis em relação aos parâmetros-chave e aos componentes de transformadores de potência [10]. É interessante notar que a utilização destas tecnologias ao longo dos anos gerou uma grande quantidade de dados acumulados e simultaneamente um problema associado: O que fazer com esses dados, visto que para uma análise apropriada dos mesmos seriam necessários tempo e recursos em maior escala de forma a transformá-los em informações úteis a respeito dos equipamentos em operação [10].

Com o atual cenário da economia mundial, onde a competitividade empresarial assumiu escala inédita, as empresas do setor elétrico têm buscado maior eficiência, maior qualidade no fornecimento e menor custo. Diante deste cenário, a manutenção preditiva tem sido agregada de forma incisiva à filosofia de manutenção de equipamentos. Esta filosofia tem sido utilizada inicialmente nos transformadores de potência, pois além de essenciais para as redes de transmissão e distribuição são, em geral, os maiores ativos de uma subestação [17].

O transformador é um dos principais equipamentos da área de Engenharia Elétrica, visto que está presente em todos os sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicações, operando em determinados momentos em frequência industrial e em radiofrequência. Sem esse equipamento, talvez fosse impossível a otimização desses sistemas [15]. Grandes transformadores de potência são equipamentos essenciais em um sistema elétrico e em caso de falha pode ocorrer interrupção no fornecimento de energia e perdas financeiras, assim torna-se imprescindível detectar falhas incipientes tão cedo quanto possível de forma que a manutenção seja realizada de maneira segura melhorando a confiabilidade do sistema [24].

Todos os transformadores de potência acima de 20 kVA e tensão acima de 6 kV são construídos de forma a trabalhar imersos em óleos isolantes. Tal característica tem por finalidade não apenas dissipar para o exterior o calor proveniente do efeito Joule nos enrolamentos e no núcleo, mas, sobretudo garantir um perfeito isolamento entre os componentes do transformador [16]. Durante sua operação, esses equipamentos são submetidos a esforços que, somados ao seu processo de envelhecimento natural, deterioram o óleo isolante dando origem a algumas características que podem alterar o funcionamento do transformador e causar falhas nos mesmos. Estas características podem ser verificadas por meio de inúmeros ensaios, dentre eles podemos destacar: Físico-Químico, Furfuraldeído e Cromatografia.

O guia IEEE “Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment” [18] indica a existência de diversos testes de significância prática que podem ser aplicados ao óleo isolante, tais como Rigidez Dielétrica, Fator de Potência e Tensão Interfacial. Para cada equipamento, são obtidos estes dados como resultado dos ensaios Físico-Químicos.

Desde a década de 70, a resistência do papel face à tensão sofrida, tem sido estudada no sentido de estimar a vida residual do papel isolante em transformadores. Esse tipo de papel utilizado, que é um papel resistente conhecido como *kraft*, é submerso em óleo mineral na maioria dos casos. Existe ainda outro tipo de material denominado *pressboard* que é resistente a altas temperaturas. O valor de resistência à tensão é uma característica bastante utilizada na detecção de falhas em transformadores, entretanto há dificuldade associada na coleta dessa amostra nos equipamentos em serviço, pois tal procedimento ocasiona interrupção no serviço, além de não se conhecer ainda meios efetivos de se obter amostras representativas do papel. Dessa forma, tem sido bastante utilizado o grau de polimerização (GP) para avaliar as condições do papel isolante [19]. Neste contexto o teste furfural apresenta vantagens consideráveis em relação ao método de coleta direta do papel isolante, pois não



necessita de interrupção do serviço. Apenas uma pequena quantidade de óleo mineral precisa ser coletada e então analisada pela cromatografia líquida de alto desempenho.

Os gases produzidos no óleo isolante durante a operação dos transformadores de potência podem ser extraídos por meio de diversos métodos, tais como Torricelli, Toepler Pump, Stripping, entre outros e a cromatografia gasosa é utilizada para analisar os gases extraídos [20]. A análise de gases dissolvidos (*Dissolved Gas Analysis* - DGA) é uma prática comum no diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência. Alguns estudos indicam que corona (descargas elétricas no enrolamento), sobreaquecimento (sobrecarga do transformador) e arco elétrico são as três principais causas de degradação no sistema de isolamento de um transformador de potência. Os gases produzidos durante estes eventos incluem Hidrogênio (H_2), Metano (CH_4), Acetileno (C_2H_2), Etano (C_2H_6), Monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) [21].

Por se tratar de um dos equipamentos mais onerosos para uma subestação, é imprescindível um acompanhamento criterioso do estado de operação, aumentando, assim, a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. Nos últimos anos, diversas técnicas para diagnóstico de falhas têm sido propostas, incluindo o método convencional de gases-chave, método das razões e recentemente sistemas especialistas, métodos baseados em lógica fuzzy, redes neurais e métodos híbridos que combinam lógica fuzzy e abordagem de inteligência artificial [21].

Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas cada vez mais especializadas pode melhorar ainda mais o diagnóstico de falha em seu estágio inicial possibilitando emitir avisos antecipados de ocorrência de falhas, evitar a utilização de forma não apropriada das unidades, agendar manutenções de forma conveniente e realizar monitoramento das unidades em sobrecarga.

Este trabalho de dissertação de mestrado apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência. Ela utiliza base de dados de cromatografia gasosa e critérios de diagnóstico já consolidados na literatura. Utiliza ainda uma metodologia evolucionária com a finalidade de identificar o tipo de falha incipiente existente no equipamento.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia utilizando técnicas de otimização, baseadas em algoritmos evolucionários, para diagnóstico de falhas em transformadores de potência através da detecção de regras em base de dados de cromatografia. A proposta é implementar um algoritmo baseado em Programação Genética e comparar seus resultados com outras ferramentas como Árvore de Decisão e Redes Neurais Artificiais com a finalidade de avaliar o seu desempenho. A partir de simulações com base de dados reais realiza-se uma análise comparativa das mesmas para verificar o potencial da programação genética aplicada a este problema.

A partir da detecção de falhas em estágios iniciais é possível reduzir custos operacionais de manutenção, bem como aumentar a vida útil dos equipamentos por meio de intervenções programadas nos mesmos.

1.3 Escopo

Este trabalho de dissertação de mestrado tem como escopo o desenvolvimento de protótipos de sistema de diagnósticos de falhas incipientes baseado em técnicas de computação evolucionária e base de dados de cromatografia.



1.4 Contribuições da Dissertação

As contribuições deste trabalho serão listadas a seguir na ordem em que aparecem na estrutura deste documento.

Um levantamento sobre o problema de falhas no sistema de isolamento do transformador

Embora esta não seja a principal contribuição deste trabalho, é apropriado mencionar o levantamento dessas informações, uma vez que proporciona uma visão ampla das falhas que podem ocorrer nos transformadores em virtude da deterioração de seu sistema de isolamento.

MINERA: Um framework para descoberta de regras em banco de dados

Após avaliação das arquiteturas, modelos e métodos durante a pesquisa, é proposto um framework chamado MINERA para ser utilizado no processo de descoberta de regras. Esse framework abrange as principais funcionalidades requeridas no processo de mineração de dados. Possui ampla aplicabilidade e pode servir como ferramenta auxiliar em novas pesquisas. Foram realizadas algumas provas de conceitos com essa ferramenta a qual apresentou resultados muito interessantes.

1.5 Estrutura do Trabalho

Inicialmente é realizado um estudo a respeito do sistema de isolamento de transformadores e de suas principais fragilidades. No capítulo 2 São mapeadas as falhas ocasionadas pelo envelhecimento e deterioração do sistema de isolamento tanto sólido quanto líquido.

Em seguida são descritos os procedimentos comuns adotados na manutenção preditiva: Análise Termográfica, Análise Físico-Química e Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos no Óleo. Nesta última são analisados os gases mais comuns que aparecem no óleo quando ocorre uma falha no equipamento. É descrita ainda a Análise dos Furfuraldeídos no Óleo e o Grau de Polimerização do Papel Isolante.

A partir da seção 2.4 são apresentados os métodos clássicos de detecção de falhas incipientes, os quais foram desenvolvidos de forma empírica. São descritos então os métodos baseados na taxa de evolução dos gases e os métodos baseados nas relações de determinados gases.

A seção 2.5 apresenta os métodos não-clássicos, os quais utilizam ferramentas de otimização e de inteligência computacional. É dada ênfase na Programação Genética que é o algoritmo utilizado no framework.

No capítulo 3 são apresentadas as características do framework e sua estrutura. Em seguida é realizada a primeira prova de conceito do framework com uma base de dados de Hepatite para fins de validação.

No capítulo 4 o framework é empregado na detecção de falhas em transformadores utilizando dados de cromatografia.

Por fim no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.



2. Diagnóstico de Falhas Utilizando Dados de Cromatografia: Visão Geral

2.1 Introdução

Os transformadores de potência são os mais importantes equipamentos elétricos em uma subestação. As falhas ocorridas nesses equipamentos, muitas vezes atribuída ao seu sistema de isolamento, podem ocasionar diversos tipos de problemas tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. É necessário diagnosticar as condições dos transformadores corretamente antes que essas falhas sejam agravadas. O método de análise dos gases dissolvidos no óleo isolante tem sido amplamente adotado para interpretar as relações entre os tipos de falhas e os gases dissolvidos gerados durante o processo de deterioração do sistema de isolamento do transformador.

Este capítulo aborda as falhas comuns ocorridas nos transformadores, bem como as estratégias utilizadas para minimizar os seus efeitos no sistema.

2.2 Falhas em Transformadores

Os transformadores de potência configuram-se como equipamentos elétricos de elevada complexidade funcional quando imersos em óleo isolante. É por meio do fenômeno de indução eletromagnética que ocorre a transferência de potência do circuito primário para o secundário. Durante este processo de transferência ocorrem perdas produzidas no ferro e no cobre de um transformador em virtude da imobilidade de suas partes componentes, o que dificulta a dispersão do calor. Essas perdas geram calor que provocam o aumento da temperatura das partes ativas (conjunto formado pelo núcleo, enrolamentos, blindagem, calços e ligações).

A elevação da temperatura, por sua vez, ocasiona desequilíbrio térmico entre a parte aquecida e o ambiente, que pode ser ar ou óleo, transmitindo, para este último, parte do calor produzido. Com a finalidade de refrigerar o equipamento e atuar como dielétrico, utiliza-se o procedimento de imersão do transformador em uma caixa cheia de líquido apropriado. Particularmente nos transformadores de potência, os tipos de óleo utilizados são conhecidos como parafínicos (minerais) e naftênicos (sintéticos) [30].

Os principais guias que definem os parâmetros de funcionamento dos transformadores de potência (IEC, ANSI e IEEE) consideram que o principal fator responsável pelo fim da vida útil dos transformadores está relacionado ao fator térmico dos mesmos. A vida do isolamento de um transformador é impactada fortemente pela elevada temperatura que acelera todos os fatores indesejados de degradação da isolamento [30]. Os sistemas de isolamento nos transformadores são constituídos por dois componentes principais: celulose e óleo.

2.2.1 Sistema de Isolação Sólida

O sistema de isolamento sólido é constituído, em sua maioria, de materiais à base de celulose. O papel isolante não impregnado é composto de celulose e ar e sua densidade varia em função da sua qualidade e do processo de fabricação [32].

O papel é composto por fibras de celulose e estas são constituídas por um feixe de moléculas de celulose com variações no comprimento unidas por ligações de hidrogênio, como mostra a Figura 1.



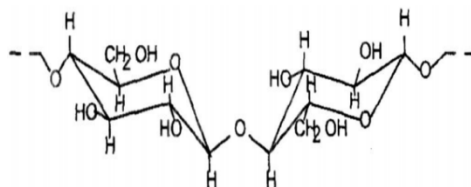


Figura 1: Composição química da celulose. Fonte: [31]

Existem diversos tipos de papéis utilizados como isolantes cujas propriedades dependem de diversos fatores como matéria prima e processo de fabricação. Os principais tipos de papéis utilizados como isolantes em transformadores são: Papel e Papelão Kraft, feitos de fibra de madeira; Papel Manilha, feito de fibra de madeira e cânhamo⁴; Pressboard, feito de papelão com fibra de algodão.

O papel Kraft tem sido amplamente utilizado desde o final do século XIX. Por apresentar um bom desempenho e baixo custo continua sendo uma boa escolha. Os equipamentos isolados com esse material são projetados para trabalhar com temperaturas relativamente baixas, entre 95°C e 98°C. Por volta de 1950, foi desenvolvida a celulose termicamente estabilizada, sendo considerado um dos maiores avanços em relação ao papel isolante, possibilitando um tempo de vida maior além de permitir operação em temperaturas mais elevadas, passando a 110°C. Na década seguinte, foi desenvolvido papel sintético com maior resistência a elevadas temperaturas, podendo operar acima de 200°C, no entanto o custo gira em torno de 10 a 50 vezes maior que o papel Kraft. Na década de 80, o conceito dos sistemas de isolamento em transformadores de potência imersos em líquido isolante sofreu mudanças significativas com a utilização do material pressboard, resistente a altas temperaturas. Foi desenvolvido ainda o sistema de isolamento híbrida, combinando materiais isolantes sólidos de alta temperatura, celulose e óleo mineral. Este último tem sido amplamente utilizado em grandes transformadores de potência os quais apresentam altos gradientes de temperatura [31].

A celulose é degradada pela ação da temperatura, do oxigênio e da umidade. De forma geral entre 90% e 95% da isolação sólida dos transformadores é influenciada pela temperatura do óleo. De 5% a 10% de celulose encontram-se nas proximidades dos condutores de corrente elétrica que operam na faixa de 10°C a 20°C acima da temperatura do óleo do transformador em operação e uma pequena porcentagem de celulose opera em temperaturas superiores a 30°C acima da temperatura do óleo. A umidade colabora substancialmente com o envelhecimento térmico do papel. Dessa forma o teor de água é um dos valores que deve ser monitorada durante a operação do transformador e com o avanço dos sensores tem se tornado uma prática comum nos sistemas de monitoramento do transformador [31].

2.2.2 Sistema de Isolação Líquida

O óleo mineral foi utilizado pela primeira vez em um transformador no ano de 1892 pela Companhia General Electric. Para ser utilizado como dielétrico, o óleo não deve apresentar água e materiais em suspensão. Como meio refrigerante é necessária baixa viscosidade e boa capacidade de transferência de calor. Os primeiros óleos utilizados eram parafínicos, óleos minerais a base de parafina, que oxidam originando borras insolúveis e por consequência aumenta a viscosidade do óleo, diminuindo a capacidade de transferência de calor, ocasionando sobreaquecimento, diminuindo, assim, sua vida útil. Dessa forma os óleos minerais parafínicos foram substituídos pelos óleos sintéticos naftênicos, que apesar de oxidarem mais facilmente não geram borra e não têm sua capacidade de transferência de calor diminuída [31].

O volume de óleo nos transformadores depende da capacidade de carga e tamanho físico dos mesmos. Para um sistema de distribuição de 25 kVA são necessários cerca de 76 litros de óleo no equipamento. Para um transformador de 400 MVA, são necessários aproximadamente 37800 litros de óleo [33].

⁴ Cânhamo ou cânhamo industrial é o nome que recebem as variedades da planta Cannabis e o nome da fibra que se obtém destas, que tem, entre outros, usos têxteis. Além de roupas, é utilizado na fabricação de papel e como forragem animal. Fonte: Wikipédia (acessado em 17/01/2010).



As **propriedades químicas** do óleo tais como Índice de Neutralização, Teor de Água, Ponto de Fulgor, estabilidade em relação à oxidação e a tendência à absorção de gases permitem avaliar a estabilidade química dos líquidos isolantes [32].

Tabela 1: Propriedades químicas do óleo isolante. Fonte: [31]

| Propriedade | Descrição |
|-------------------------------------|---|
| Índice de Neutralização ou Acidez | Indica a acidez no líquido isolante, responsáveis pela formação de borra que, uma vez depositada na parte ativa do transformador, dificulta transferência de calor. |
| Teste da Cor | Indica formação de borra ou contaminações do óleo. Dificulta a dissipação de calor. |
| Teor de Umidade | Indica quantidade de água presente no óleo. |
| Estabilidade à Oxidação | Indica a resistência à degradação dos líquidos isolantes em contato com o oxigênio. |
| Ponto de Fulgor | Indica a menor temperatura na qual se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo. |
| Ponto de Congelamento ou de Fluidez | Indica a temperatura mais baixa na qual o óleo escoar sob a ação do próprio peso. |
| Tensão Interfacial Óleo-Água | É uma força de atração entre as moléculas existentes na superfície de separação entre a água e o óleo. Indica a presença de moléculas hidrofílicas no líquido isolante, contaminação ou incompatibilidade com algum material constituinte do equipamento. |
| Rigidez Dielétrica | Verifica a resistência da passagem interna de corrente quando aplicada uma tensão no óleo isolante. |
| Fator de Potência | Relacionado com as perdas dielétricas do óleo isolante. |

Os hidrocarbonetos, misturados de forma complexa, originam os óleos crus. Dependendo da fonte do óleo cru, a quantidade desses hidrocarbonetos é variável. Os óleos utilizados no transformador possuem composição que variam em função da origem do óleo cru e mesmo não sendo viável analisar todas as variedades moleculares existentes, algumas características do óleo refletem o comportamento das suas classes de hidrocarbonetos [31].

As **propriedades físicas** do óleo isolante (viscosidade e condutividade) permitem uma avaliação das características relacionadas à refrigeração. Por viscosidade, entende-se a capacidade que o óleo apresenta de transferir calor do transformador para o meio ambiente, por meio da resistência que o óleo apresenta ao escoamento contínuo sem turbulência, inércia ou outras forças. O óleo mineral apresenta a mais baixa viscosidade de todos os fluidos. Este fator, aliado à elevada condutividade dos condutores, possibilita a utilização de reduzido volume de óleo para refrigeração de equipamentos, tornando-os mais compactos e, portanto, mais baratos. Quando um transformador está em operação, ocorre um aumento significativo do calor interno, ocasionado por perdas no núcleo e enrolamento, que pode elevar a taxa de envelhecimento dos componentes não metálicos, reduzindo a vida do sistema de isolamento. Dessa forma é de fundamental importância a busca pelo equilíbrio entre o calor produzido e a capacidade de transferência desse calor [31].

A oxidação do óleo é decorrente de vários fatores, dentre eles podemos destacar a ação do campo elétrico, concentração do oxigênio dissolvido no óleo, efeito da luz e temperatura. Quando ocorre a oxidação alguns ácidos são produzidos realizando mudanças físicas e químicas em suas propriedades, reduzindo a resistividade elétrica do óleo, a resistência mecânica do papel isolante e aumentando sua perda dielétrica. A tensão interfacial do óleo é reduzida e a água torna-se mais solúvel. No entanto existem dispositivos para minimizar esses efeitos e preservar o óleo mineral isolante evitando contaminação por umidade, impurezas e oxigênio do ar, contribuindo para minimizar os riscos de falhas diminuindo as intervenções de manutenção no equipamento [30].



2.2.3 Envelhecimento da Isolação e os Problemas no Transformador

Pode-se definir o envelhecimento de um sistema de isolação elétrica como alterações irreversíveis das suas propriedades em virtude da ação de um ou mais fatores de envelhecimento [36]. O envelhecimento elétrico é influenciado pela força do campo gerado quer seja uma fonte AC, DC ou a um impulso. Tal fator ocasiona eletrólise, aumento de temperatura e surgimento de descargas parciais. Da mesma forma, a ocorrência de estresse mecânico colabora com o envelhecimento mecânico e envolve o desgaste dos componentes da isolação, efeitos termomecânicos e ruptura da isolação em virtude dos altos níveis de estresse mecânico.

A isolação elétrica em equipamentos de alta tensão deve apresentar propriedades térmicas, químicas e mecânicas de forma a realizar a função para a qual foi projetada. A função primária da isolação elétrica nesses equipamentos é diminuir, ao mínimo, o fluxo de corrente entre condutores submetidos à diferença de potencial elétrico, suportando o campo elétrico resultante. Para essa finalidade geralmente é utilizado o papel impregnado com óleo isolante [34].

A maior parte da isolação sólida dos transformadores é composta por papel derivado da celulose por apresentar elevada resistência de isolamento quando seco, no entanto são altamente higroscópicos⁵. Ao mergulhar a celulose seca em óleo contendo umidade, esta é rapidamente absorvida pelo papel. Dessa forma, antes de mergulhar no óleo, é necessário impregnar o papel com verniz ou resina isolante com finalidade de retardar a absorção de água [30].

Os transformadores quando estão em operação realizam esforços elétricos e mecânicos e sofrem estresses térmicos ocasionando a degradação do papel e do óleo isolante. A umidade em excesso pode gerar bolhas de vapor de água que comprometem seriamente o líquido isolante e como conseqüência ocorre deterioração das suas propriedades químicas, físicas e elétricas.

A expectativa de vida de um equipamento está associada à resistência em relação à tração do papel isolante, que garante a resistência aos esforços mecânicos transitórios oriundos de curtos-circuitos, surtos de tensão e transitórios de ligamentos e desligamentos. Após esses fenômenos, o papel deve possuir elasticidade suficiente para retornar à sua posição original sem romper a isolação celulósica ou perder de forma severa suas características dielétricas, pois isso levaria o transformador à falha elétrica.

Um transformador pode apresentar falhas elétricas, mecânicas ou térmicas que podem ser ocasionadas por interrupções forçadas em virtude de avarias no enrolamento ou no comutador de derivações de um transformador em operação [30].

Ao se analisar as falhas em equipamentos, é interessante observar a taxa de falhas *ou função de risco* $h(t)$, definida da seguinte forma na teoria da confiabilidade:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{d}{dt} \ln R(t)$$

Onde:

$R(t) = 1 - F(t)$ é conhecida como confiabilidade e $F(t)$ é a função de distribuição cumulativa de falhas

$f(t) = -dF(t)/dt$ é a função densidade de probabilidade de falhas

Para calcular a probabilidade de um equipamento de idade t falhar no intervalo $(t, t+dt)$ é dada por $h(t)dt$.

Supondo que um equipamento não envelhece ou permanece tão bom quanto novo, sua função de risco ou taxa de falhas $h(t)$ é uma constante. Dessa forma, pela da taxa de falhas $h(t)$, sua confiabilidade é uma distribuição exponencial definida a seguir:

⁵ Higroscopia é a propriedade que possuem certos materiais de absorver água.

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Higroscopia>

Acessado em 28/07/2010.



$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Podemos então perceber que falhas podem ocorrer durante todo o tempo de operação desses equipamentos não importando a idade e sim as condições ambientais severas e aleatórias a que estão sujeitos.

Ao longo dos anos as distribuidoras de energia elétrica acumularam grandes volumes de dados e seus pesquisadores perceberam que o comportamento da taxa de falhas dos transformadores tem seguido dois padrões: a tradicional Curva da Banheira ou a Curva da Banheira Generalizada [30]. As ilustrações apresentadas pela Figura 2 e Figura 3 mostram as curvas desses padrões.

A Curva da Banheira Generalizada, apresentada na Figura 3, é uma variação da Curva da Banheira Tradicional e pode apresentar quatro ou mais estágios. Na curva “a”, o estágio inicial tem a taxa de falha incrementada abruptamente em virtude de imperfeições no processo de fabricação, manipulação ou em processos de controle. A taxa de falha se eleva rapidamente e em seguida ocorre um período de decréscimo das falhas. A curva “b” apresenta um comportamento diferente mostrando um decréscimo da taxa de falhas que corresponde à região de Mortalidade Infantil da tradicional Curva da Banheira. Em seguida apresenta um estágio de incremento dessas falhas, semelhantes aos problemas ocorridos na curva “a” [30].

Espera-se que os transformadores de potência tenham um processo de envelhecimento normal, no entanto, durante sua operação podem ocorrer falhas que colaboram para o envelhecimento mais acelerado, aumentando a probabilidade de falha[30].

Verificando a Curva da Banheira, observa-se que no último estágio há um aumento significativo da taxa de falhas em curto espaço de tempo. Isto ocorre quando há perda da resistência mecânica da isolamento sólida dos enrolamentos, indicando que a vida do transformador chegou ao fim [30].



Figura 2: Curva da Banheira Tradicional. Fonte: [30]



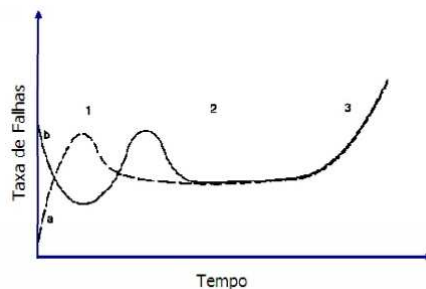


Figura 3: Curva da Banheira Generalizada. Fonte: [30]

A partir de um estudo a respeito de falhas ocorridas em transformadores de potência, realizado pelo Grupo de Trabalho do CIGRÉ sobre falhas em grandes transformadores de potência, podemos montar os seguintes cenários apresentados pela Figura 4 e Figura 5. É importante ressaltar que são transformadores com comutador de derivações sob carga. Neste cenário, 41% das falhas ocorrem nos comutadores de derivação sob carga, 19% ocorrem nos enrolamentos e 40% ocorreram em outros locais. Com relação à origem das falhas, 53% são de origem mecânica e 31% dielétrica [30].

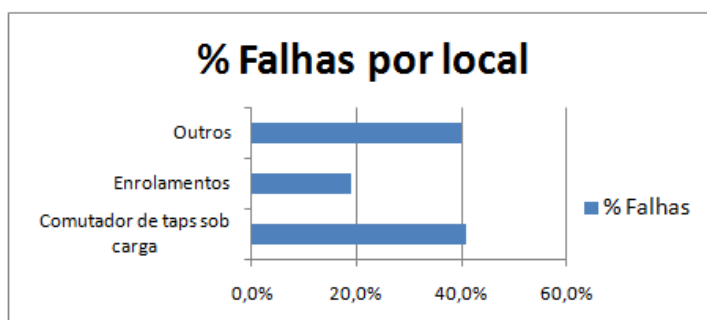


Figura 4: Transformadores com comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por local onde ocorre falha. Fonte: [30]

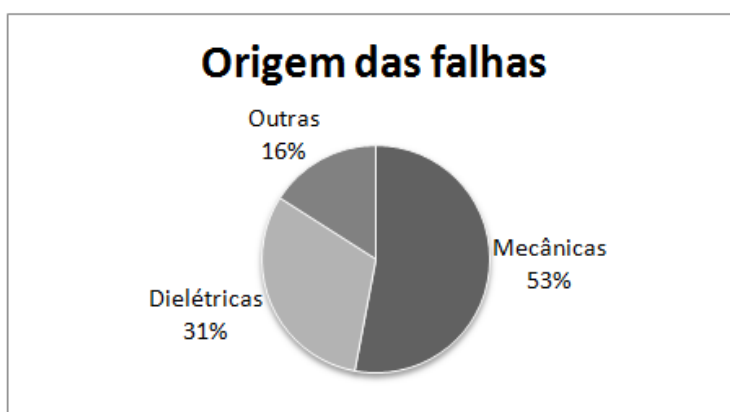


Figura 5: Transformadores com comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por origem. Fonte: [30]

Em transformadores sem comutador de derivações sob carga, foi verificado o seguinte cenário mostrado pela Figura 6.



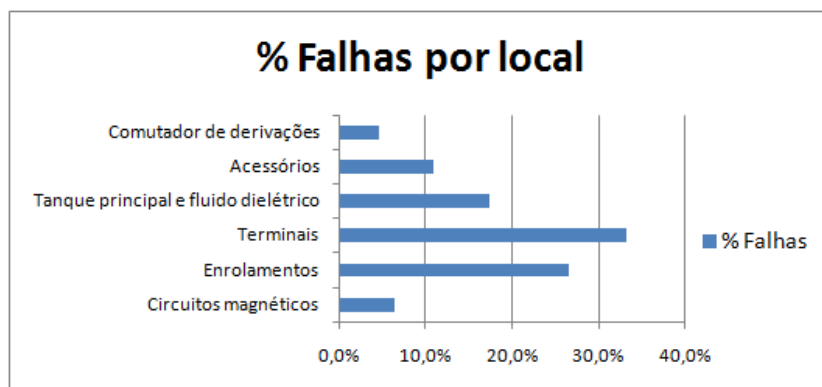


Figura 6: Transformadores sem comutador de derivações sob carga: Taxa de falhas por local onde ocorre falha. Fonte: [30]

As taxas de falhas por local neste cenário indicam que 26,6% das falhas ocorrem nos enrolamentos, 6,4% ocorrem nos circuitos magnéticos, 33,3% ocorrem nos terminais, 17,4% ocorrem no tanque principal e fluido dielétrico, 11% são devidas aos acessórios e 4,6% são devidas ao comutador de derivações.

Em 1982, o Grupo de Trabalho sobre falhas em grandes transformadores de potência, do CIGRÉ, analisou uma base de dados de falhas em transformadores ocorridas durante 10 anos em concessionárias do mundo todo e foi possível perceber que grande parte das falhas (77%) estava relacionada ao processo de construção do equipamento, sendo 36% relacionadas ao projeto, 28% relacionadas ao processo de fabricação e 13% relacionadas a defeitos no material utilizado. A Figura 7 apresenta visão geral deste cenário.

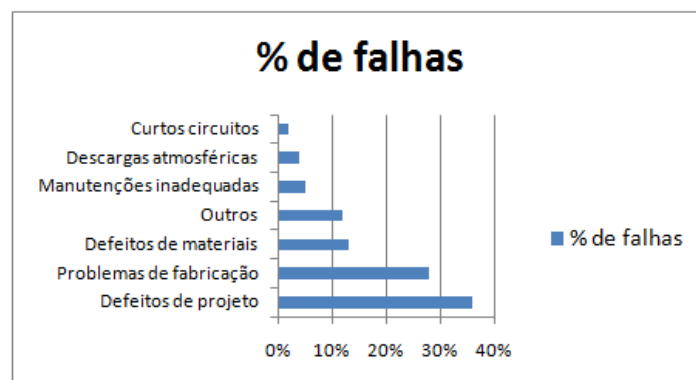


Figura 7: Principais causas de falhas ocorridas em transformadores. Fonte: [30]

A experiência vivida nesse período possibilitou o entendimento das causas de falhas nos transformadores e sinalizou quais mudanças deveriam ser implementadas nos projetos de forma adequada a cada necessidade operativa, pois até então os fabricantes seguiam de forma rígida os conceitos e padrões internacionais, desprezando as particularidades e necessidades dos compradores [30].



2.3 Manutenção Preditiva em Transformadores

Existem três técnicas de manutenção em transformadores: Preditivas, Preventivas e as Corretivas.

A **manutenção preventiva** é realizada de forma programada e considera o envelhecimento do equipamento a partir do tempo de operação. Realiza ensaios e verificações com o equipamento energizado ou não. A **manutenção preditiva baseada na condição** determina o ponto ótimo para executar a manutenção preventiva, isto é, indica o ponto a partir do qual a probabilidade de falha no equipamento assume valores indesejáveis. Por fim, a **manutenção corretiva** é realizada quando o equipamento deixa de cumprir sua função principal em virtude de uma falha [30].

Neste trabalho será dado enfoque à manutenção preditiva, pois sua função não é eliminar as manutenções preventivas e corretivas, mas sim minimizá-las por meio de acompanhamento dos parâmetros do equipamento sem a necessidade de desligamentos ou interrupções no fornecimento de energia elétrica.

A manutenção preditiva utiliza a análise de tendência para emitir diagnóstico com antecedência. A seguir serão descritas algumas formas de execução da manutenção preditiva, no entanto o escopo deste trabalho é a análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo, apresentado na seção 2.3.3.

2.3.1 Análise Termográfica

Também conhecida como Termovisão, utiliza câmeras apropriadas para medir a energia infravermelha que irradia dos objetos sem a necessidade de contato físico. Permite monitorar o comportamento térmico detectando e quantificando calor nos equipamentos. A Figura 8 ilustra um exemplo de câmera utilizada para capturar as imagens. A Figura 9 ilustra a detecção de sobreaquecimento no transformador [30].



Figura 8: Câmera utilizada em termovisão. Fonte: [30]



Figura 9: Baixo nível de óleo isolante, ocasionando sobreaquecimento. Fonte: [30]

A tecnologia de infravermelho detecta calor nos objetos. Tudo que possui uma temperatura acima de zero absoluto emite calor, mesmo objetos muito frios, como gelo emite radiação infravermelha.



A elevação da temperatura faz com que a quantidade de infravermelhos também aumente. Assim, torna-se bastante interessante sua utilização em subestações e redes de distribuição de Energia Elétrica, visto que possibilita identificar pontos de má conexão elétrica, conhecidos como “pontos quentes”. Essas más conexões são ocasionadas pelo afrouxamento de conexão, corrosão, recozimento de cabos, entre outros.

2.3.2 Análise Físico-Química

O petróleo é a fonte de diversos produtos, sobretudo dos óleos minerais isolantes. Esse óleo é obtido a partir de um subproduto do petróleo conhecido como gasóleo pesado, cuja faixa de destilação está entre 321° C e 427° C. São constituídos basicamente por hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos. Apresentam também em menor quantidade hidrocarbonetos aromáticos, heterocompostos e de nitrogênio.

As características físico-químicas do óleo devem ser acompanhadas por meio de ensaios periódicos de forma a monitorar a degeneração do óleo. Este processo possibilita identificar o grau de influência de contaminantes, tais como ácidos, partículas sólidas em suspensão, água e borra, em suas propriedades dielétricas. Sua função principal é uma avaliação quantitativa e qualitativa dos produtos oriundos de degradação presentes no óleo. Avalia ainda os processos que aceleram o envelhecimento do equipamento, tais como agentes de oxidação, umidade, entre outros.

O processo de coleta do óleo deve ser realizado de forma bastante cuidadosa a fim de evitar contaminação do recipiente de amostra o que modificaria o resultado da análise, conduzindo a conclusões erradas sobre a qualidade do óleo e a confiabilidade do equipamento. A Figura 10 ilustra o procedimento de coleta de óleo para análise físico-química.



Figura 10: Coleta de óleo mineral para análise. Fonte: [30]

Os principais ensaios físico-químicos utilizados são: Densidade a 20°C / 4°C; Tensão interfacial a 25°C; Índice de Refração a 20° C; Índice de Neutralização; Teor de Água; Rigidez Dielétrica; Fator de Potência a 100° C ou Fator de Dissipação a 90° C [30].

2.3.3 Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos no Óleo

Durante o processo de envelhecimento do óleo mineral, formam-se gases que são produzidos de forma mais acentuada quando ocorre alguma falha nos transformadores ou reguladores de tensão. Através da análise dos gases dissolvidos (*Dissolved Gas Analysis - DGA*), ou Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos é possível avaliar a condição de operação do isolamento do equipamento, por meio da detecção de eventuais processos de falha que possam estar ocorrendo. Sua função é determinar a composição desses gases, associando a cada uma um provável tipo de falha [39].



Quando uma grande quantidade de gases combustíveis está presente em transformadores, estes podem entrar em operação, desde que sejam investigados e avaliados os riscos desta operação [39].

Quando uma falha está no início, conhecida como falha incipiente, são produzidos gases em baixa concentração. O monitoramento das concentrações desses gases de forma periódica pode evitar problemas de maior gravidade nos transformadores. A extração desses gases é realizada de diversas formas, no entanto a mais utilizada e aceita é a extração por meio de vácuo.

Após a extração de amostra do óleo, os gases são analisados em laboratório por cromatógrafos de precisão que realizam medições e detectam gases em níveis de partes por milhão (ppm). No entanto para uma avaliação dos transformadores de potência em relação à sua integridade e estado operativo é necessária uma análise dos dados de construção, histórico de manutenções, ciclos de carga suportados, falhas, entre outros [37].

Os gases que se formam no transformador têm origem no envelhecimento normal, no entanto sua quantidade aumenta quando ocorre arco elétrico, descargas corona, centelhamento de baixa energia, sobrecargas severas, falhas em motores das bombas e sobreaquecimento no sistema de isolamento. Esses fatores podem ocasionar a decomposição dos materiais isolantes e a formação de vários gases combustíveis ou não. Caso um transformador apresente uma falha e continue em operação, podem ocorrer sérios estragos no equipamento. Neste sentido, é de fundamental importância que as falhas sejam detectadas em seu estágio inicial de desenvolvimento, permitindo tomadas de decisão a partir da evolução dos gases.

Quando ocorre uma falha em um transformador, o óleo é decomposto pela energia disponível liberada pela falha. O modo como essa energia é liberada gera uma determinada quantidade de gases e essas quantidades relativas são características de cada tipo de falha. Os gases produzidos podem ser combustíveis ou não.

Os gases combustíveis mais comumente encontrados pela deterioração do óleo isolante são [38]:

- Monóxido de carbono (CO)
- Hidrogênio (H_2)
- Metano (CH_4)
- Etano (C_2H_6)
- Etileno (C_2H_4)
- Acetileno (C_2H_2)

Por outro lado, os gases não combustíveis encontrados com maior frequência são [38]:

- Oxigênio (O_2)
- Nitrogênio (N_2)
- Dióxido de Carbono (CO_2)

Além dos hidrocarbonetos listados anteriormente, são encontrados ainda alguns com C_3 e C_4 , no entanto estes podem ser desconsiderados em virtude da experiência ter mostrado que não influenciam de forma considerável os resultados [30].

No processo de deterioração normal da isolamento sólida, os gases originados são dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono (CO), traços de hidrogênio, metano (CH_4) e etano (C_2H_6). Quando sofre um sobreaquecimento em torno de $200^\circ C$ origina água, a uma temperatura em torno de $400^\circ C$ ocasiona formação de CO_2 , CO e em torno de $500^\circ C$, o óleo mineral produz Metano (CH_4), Etano (C_2H_6) e Etileno (C_2H_4) sempre em presença de oxigênio. O processo de pirólise do óleo ocasiona formação de hidrogênio (60% a 80%), acetileno (10% a 25%) e etileno (1,0% a 2,9%) [38].

Outros fatores que colaboram com a geração de gases são as descargas parciais, efeito corona e os arcos elétricos. As descargas parciais, ou centelhamento, são descargas em bolhas gasosas envolvidas pelo óleo ou por materiais impregnados em óleo. É considerada uma falha de baixo nível energético e ocasiona decomposição e bombardeamento iônico das moléculas de óleo produzindo principalmente hidrogênio. O centelhamento é uma descarga elétrica de baixa intensidade e curta duração, por volta de



um microssegundo ou menos. O efeito corona pode ocorrer nos ângulos dos condutores com uma tensão de cerca de 12 kV [38].

Em termos operacionais, o IEEE define os procedimentos para detecção e análise dos gases combustíveis. As prioridades a serem seguidas são [39]:

- a) Detectar o gás produzido que esteja ultrapassando os limites considerados normais e utilizar adequados critérios para identificar as possíveis anormalidades que possam estar em atividade;
- b) Avaliar, por meio de critérios ou recomendações, a confiabilidade de operação do transformador;
- c) Recomendar a ação. Este procedimento envolve tanto a confirmação da existência da falha (utilizando análise suplementar e redução da carga), quanto à retirada da unidade de serviço.

Após serem analisadas as taxas de evolução de cada gás é necessária ainda uma análise mais criteriosa em relação aos dados. Devem ser consideradas as relações dos gases encontrados. Estas relações definem faixas de valores para ocorrência de determinados tipos de falhas.

2.3.4 Análise dos Furfuraldeídos no Óleo e o Grau de Polimerização do Papel Isolante

O óleo isolante de um transformador contém inúmeras substâncias dissolvidas, entre elas encontramos o gás furano (C_4H_4O) e seus derivados conhecidos genericamente como furanos, os quais são produzidos pelas quebras das cadeias celulósicas do papel isolante. A umidade colabora para a rápida formação de furanos e como a degradação térmica da celulose produz umidade a reação torna-se autocatalítica [41].

O envelhecimento da isolação sólida indica o envelhecimento do transformador e o responsável por medir a qualidade da isolação sólida é o grau de polimerização (GP).

A degradação térmica da celulose produz inúmeros subprodutos, dentre eles destacamos o levoglucosano que é um açúcar e por ser não estável se degrada produzindo os seguintes compostos furânicos: 5 hidroximetil - 2 furfural (5H2F), álcool furfúrico ou 2 furfuol (2FOL), furfural ou furfuraldeído ou furaldeído (2FAL), 5 metil - 2 furfural (5M2FAL), 2 acetilfurano ou 2 furil-metil-cetona (2ACF) e 2 ácido furóico. Este último, por ser insolúvel no óleo, isto é, permanece no papel, não é considerado no grupo dos compostos furânicos usados para avaliar a degradação do papel [42].

O grau de polimerização é diminuído quando ocorre a quebra das cadeias de celulose do papel isolante, afetando as propriedades mecânicas reduzindo algumas características como a resistência à tração, ao alongamento, entre outras. Para medir o GP é necessário colher amostras do papel isolante que somente podem ser obtidas com o transformador desenergizado, ou seja, é necessário retirar de operação o equipamento ocasionando perdas financeiras para as concessionárias e para os consumidores. Dessa forma torna-se interessante a análise de concentração furfural para estimar a vida útil do papel isolante do transformador de potência [31].

Alguns pesquisadores como Burton, Vuarchex e Chendong criaram modelos empíricos para determinar a correlação entre a concentração de furanos no óleo isolante e o grau de polimerização. A partir da análise da concentração do teor furfural é possível identificar dois tipos de processos de envelhecimento: prematuro e final de vida. Um equipamento é diagnosticado como prematuramente envelhecido quando apresentam um processo de envelhecimento superior a sua idade cronológica [31]. A Figura 11 apresenta o gráfico elaborado pelo pesquisador P. Burton. Tomando como exemplo, um transformador com 18 anos de idade apresentando teor furfural de 2ppm será considerado prematuramente envelhecido, pois sua idade calculada é de 24 anos (GP=450). Isso indica que está 33% acima da idade real [31].



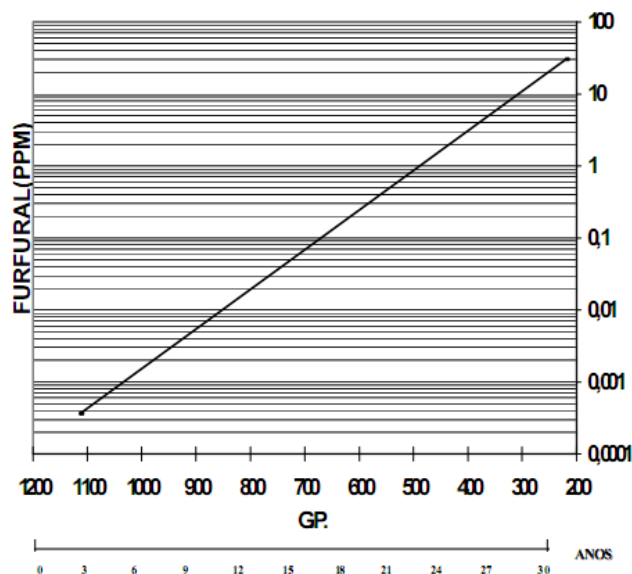


Figura 11: Correlação entre teor furfural e grau de polimerização de acordo com Burton.

O cálculo do GP proposto por Burton pode ser realizado utilizando a seguinte equação:

$$GPFUR = -187,5 \cdot \log\left(\frac{FUR}{1000}\right) + 467,5$$

onde *FUR* indica a concentração de furfural no óleo.

2.3.5 Limitações

A análise de gases dissolvidos é baseada mais em evidências empíricas do que em fatos científicos, assim a exatidão nos resultados fica comprometida. Diversos fatores contribuem para que haja incertezas tanto nos valores medidos em relação ao teor de gases dissolvidos quanto na sua interpretação.

De acordo com Zirbes et al [34], A degradação do óleo isolante, por influência da temperatura, gera diversos subprodutos. Desses subprodutos, apenas uma parte é utilizada nas análises. Alguns desses gases são formados em uma ampla faixa de temperatura com quantidades variáveis. Existe ainda a possibilidade da formação de gases por meio de outros processos físicos e químicos, como ocorre com o gás hidrogênio que é produzido tanto em uma faixa de temperatura mais extensa como por reações de hidrólise que ocorrem nos equipamentos em virtude da ação de metais. Alguns equipamentos são constituídos de metais que possuem hidrogênio em sua composição.

Outro fator a ser considerado é a transferência de gases entre celulose e óleo a qual depende da temperatura ambiente e pode determinar concentrações de gases diversificadas. Neste caso pode-se utilizar um referencial de temperatura com a finalidade de diminuir a incerteza nos resultados das análises [43][44].

O volume de gases gerados está diretamente relacionado ao tipo de equipamento e ao seu projeto. A análise de gases é uma técnica recomendada para equipamentos que utilizam óleo e celulose no seu sistema de isolamento, no entanto essa técnica é tradicionalmente utilizada em transformadores de potência. A norma IEC 60599 reconhece que o comportamento difere entre equipamentos em relação à geração de gases e estabelece diferentes limites de acordo com o tipo de equipamento [34].

Assim, é importante destacar que os resultados podem apresentar incertezas significativas no caso do transformador apresentar baixas concentrações de gases. Nestas situações os resultados podem ser interpretados de forma errônea em relação ao tipo de falha em evolução.



2.4 Métodos Clássicos de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas Incipientes

Ao longo dos anos, alguns pesquisadores desenvolveram, de forma empírica, alguns métodos próprios para diagnóstico de falhas em transformadores, utilizando análise dos gases chaves combustíveis dissolvidos no óleo isolante. As publicações derivadas destas pesquisas transformaram-se em normas ou recomendações e estão em constante modificação em relação aos valores limites para identificação de falhas [39].

Os métodos mais utilizados são o Método de Duval, que considera concentração de três tipos de gases. O Método de Döernenburg e o Método de Rogers levam em consideração o nível de degradação térmica no diagnóstico de falhas. Os resultados das análises de concentrações de gases são comparados com valores pré-estabelecidos e catalogados internacionalmente, os quais indicam a intensidade do problema. Este método foi inicialmente pesquisado por Döernenburg e posteriormente desenvolvido por Rogers e utiliza as seguintes relações de gases:

$$R1: \frac{CH_4}{H_2}$$

$$R2: \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

$$R3: \frac{C_2H_2}{CH_4}$$

$$R4: \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$$

$$R5: \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Os critérios utilizados por Rogers e Döernenburg pertencem à norma internacional IEEE C57.104 de 1991.

2.4.1 Taxa de Evolução dos Gases

As análises baseadas nas concentrações dos gases tornam-se bastante significativas quando a taxa de evolução dos gases passa ser considerada. Para tal é necessário que sejam estudadas famílias de transformadores com mesmo fabricante e carregamento semelhante. A equação da taxa de evolução é apresentada pela seguinte equação:

$$TE (\%) = \frac{(TGU - TGP) \cdot 100}{TGP \cdot IMA}$$

Onde:

TE (%) = Percentual da taxa de evolução

TGU = Taxa do gás na última análise

TGP = Taxa do gás na penúltima análise

IMA = Intervalo, em meses, entre as análises

Para realização desse método deve-se proceder a análises em intervalos de tempo regulares. Deve-se ainda, para cada análise, calcular a taxa de geração do gás-chave da falha. Por fim deve-se comparar a taxa de geração obtida com a anterior.

2.4.2 Método de Duval

O método Duval esboça os dados num gráfico ternário dividido em áreas de tipos de defeitos.



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

A análise de gases dissolvidos (DGA) permite detectar algumas falhas nos transformadores, as quais foram codificadas pelo IEC 60599 da seguinte forma:

PD - Descargas parciais

D1 - Descargas de baixa energia

D2 - Descargas de alta energia

T1 - Falha térmica para temperaturas abaixo de 300°C

T2 - Falha térmica para temperaturas entre 300 e 700°C

T3 - Falha térmica para temperaturas acima de 700°C

A partir dos valores obtidos e das falhas identificadas por inspeção visual, foi criada uma base de dados conhecida como IEC TC10. Esta base de dados foi utilizada no desenvolvimento do triângulo de Duval. Este método de diagnóstico, proposto inicialmente na década de 80 pelo pesquisador Dr. Michel Duval, consiste na análise dos gases acetileno (C_2H_2), metano (CH_4) e etileno (C_2H_4) presentes no óleo isolante dos transformadores e que são utilizados em cálculos simples para identificar as falhas no equipamento. O método de representação utilizado, que facilita a visualização dos diferentes tipos de problemas, foi aprimorado nas décadas seguintes, apresentando pontos onde ocorre sobreposição de falhas. O triângulo de Duval é representado na Figura 12.

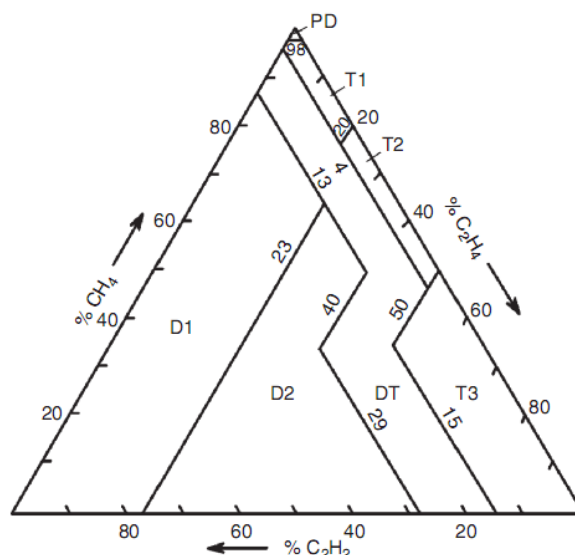


Figura 12: Diagrama ternário IEC (Duval)

As coordenadas do triângulo correspondem aos resultados da DGA medidos em ppm e são calculadas da seguinte forma [45][46]:

$$\%C_2H_2 - 100x / (x+y+z)$$

$$\%C_2H_4 - 100y / (x+y+z)$$

$$\%CH_4 - 100z / (x+y+z)$$

Onde:

$$x = C_2H_2$$

$$y = C_2H_4$$

$$z = CH_4$$

Os valores são medidos em ppm.



2.4.3 Método das Razões de Döernenburg

Este método utiliza as relações R1, R2, R3 e R4 e requer uma quantidade significativa de gases para maior acurácia do diagnóstico. Sugere a existência de três tipos de falhas básicas: decomposição térmica, descargas parciais de baixa intensidade (Corona) e descargas parciais de alta intensidade (Arco elétrico) [7]. Os valores dos gases obtidos nas análises são submetidos às razões R1, R2, R3 e R4 e comparados com algumas concentrações catalogadas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Valores utilizados no Método das Razões de Döernenburg.

| | R1 | | R2 | | R3 | | R4 | |
|--|--------------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Origem dos gases | | Origem dos gases | | Origem dos gases | | Origem dos gases | |
| Diagnóstico sugerido para a falha | Dissolvido no óleo | Gases livres | Dissolvido no óleo | Gases livres | Dissolvido no óleo | Gases livres | Dissolvido no óleo | Gases livres |
| Decomposição térmica | > 1,0 | > 1,0 | < 0,75 | < 1,0 | < 0,3 | < 0,1 | > 0,4 | > 0,2 |
| Corona (Descargas parciais de baixa intensidade) | < 0,1 | < 0,01 | Não significativo | | < 0,3 | < 0,1 | < 0,4 | > 0,2 |
| Arco Elétrico (Descargas parciais de alta intensidade) | > 0,1 < 1,0 | > 0,01 < 0,1 | > 0,75 | > 1,0 | > 0,3 | > 0,1 | < 4,0 | < 0,2 |

2.4.4 Método das Razões de Rogers

Utiliza as relações de concentração de gases e limites de variação destas relações para emitir diagnóstico do equipamento. Os gases envolvidos são CH_4 , H_2 , C_2H_6 , CH_4 , C_2H_4 . A seguir, na Tabela 3, são apresentadas as relações dos gases para obtenção do diagnóstico [22].

Tabela 3: Diagnóstico Sugerido para as Razões dos Gases.

| CH ₄ /H ₂ | C ₂ H ₆ /CH ₄ | C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ | DIAGNÓSTICO |
|---------------------------------|--|--|--|---|
| > 0,1 < 1,0 | < 1,0 | < 1,0 | < 0,5 | Normal |
| <= 0,1 | < 1,0 | < 1,0 | < 0,5 | Descarga Parcial / Corona |
| <= 0,1 | < 1,0 | < 1,0 | >= 0,5 < 3,0 ou >= 3,0 | Descarga Parcial / Corona |
| > 0,1 < 1,0 | < 1,0 | >= 3,0 | >= 3,0 | Descarga Contínua |
| > 0,1 < 1,0 | < 1,0 | >= 1 < 3,0 ou >= 3,0 | >= 0,5 < 3,0 ou >= 3,0 | Arco |
| > 0,1 < 1,0 | < 1,0 | < 1,0 | >= 0,5 < 3,0 | Arco |
| >= 1 < 3,0 ou >= 3,0 | < 1,0 | < 1,0 | < 0,5 | Sobreaquecimento - até 150° C |
| >= 1 < 3,0 ou >= 3,0 | >= 1,0 | < 1,0 | < 0,5 | Sobreaquecimento - de 150 a 200° C |
| > 0,1 < 1,0 | >= 1,0 | < 1,0 | < 0,5 | Sobreaquecimento - de 200 a 300° C |
| > 0,1 < 1,0 | < 1,0 | >= 1,0; < 3,0 | < 0,5 | Sobreaquecimento no condutor |
| >= 1 < 3,0 | < 1,0 | >= 1,0; < 3,0 | < 0,5 | Correntes circulando nos enrolamentos |
| >= 1 < 3,0 | < 1,0 | >= 3,0 | < 0,5 | Correntes circulando no núcleo e tanque ; Sobrecarga nas articulações |



É importante frisar que várias ocorrências simultâneas de falhas podem causar ambigüidade nas análises [22].

2.4.5 Método Proposto na NBR 7274

Este método, baseado na IEC 599/78, é semelhante ao método de Rogers, variando alguns limites das relações, bem como modificações na interpretação dos valores de cada diagnóstico [34].

A Tabela 4 apresenta as interpretações da análise de gases de acordo com a norma NBR 7274. A letra T indica a temperatura.

Tabela 4: Interpretação das concentrações de gases conforme NBR 7274.

| C2H2/C2H4 | CH4/H2 | C2H4/C2H6 | DIAGNÓSTICO |
|-----------|-----------|-----------|--|
| < 0,1 | 0,1 a 1,0 | < 1,0 | Envelhecimento Normal |
| < 0,1 | < 0,1 | < 1,0 | Descarga Parcial de Baixa Energia |
| 0,1 a 3,0 | < 0,1 | < 1,0 | Descarga Parcial de Alta Energia |
| > 0,1 | 0,1 a 1,0 | > 1,0 | Arco - Descarga de Baixa Energia |
| 0,1 a 3,0 | 0,1 a 1,0 | > 3,0 | Arco - Descarga de Alta Energia |
| < 0,1 | > 0,1 | < 1,0 | Sobreaquecimento (150° C < T < 300° C) |
| < 0,1 | > 0,1 | 0,1 a 3,0 | Sobreaquecimento (300° C < T < 700° C) |
| < 0,1 | > 0,1 | > 3,0 | Sobreaquecimento (T > 700° C) |

2.5 Métodos Não-Clássicos para diagnóstico de falhas

As bases de dados são estruturas ricas em informações escondidas e que podem ser usadas para tomada de decisão inteligente. Neste contexto, **Classificação** e **Predição** são duas formas de análises de dados que podem ser utilizadas tanto para extrair modelos que descrevem importantes classes de dados quanto para fazer uma previsão de dados futuros ou tendência dos dados. Enquanto a **Classificação** prediz os dados de forma categórica, discreta, a **Predição** modela funções com valores contínuos. Como exemplo, podemos construir um modelo de classificação para categorizar aplicações de empréstimo bancário como “segura” ou “risco” ou um modelo de predição para despesas de potenciais clientes interessados em equipamentos de informática tomando como base sua renda e ocupação. Muitos métodos de classificação e predição têm sido propostos por pesquisadores em aprendizado de máquina, reconhecimento de padrões e estatística [48].

Neste trabalho são abordados somente os métodos de classificação utilizando Programação Genética, Árvore de Decisão e Redes Neurais. Dentre estes métodos, é enfatizada a Programação Genética que é o algoritmo implementado na ferramenta proposta.

Na natureza, estruturas biológicas, que obtêm êxito na luta em seu ambiente, sobrevivem e se reproduzem sob elevada taxa. Os cientistas biólogos que interpretam tais estruturas as observam, na natureza, como consequência da seleção natural Darwiniana operando em um ambiente dentro de um período de tempo. Em outras palavras, na natureza uma estrutura é consequência da sua aptidão. Passaremos a referenciar essa aptidão como *fitness*. Assim, podemos afirmar que *fitness* indica quais os indivíduos terão mais chance de sobreviver no ambiente [28].

Alguns problemas de otimização têm sido resolvidos por meio de *simulação de processos evolutivos naturais*. A aprendizagem de máquina (*machine-learning*) tem sido abordada de forma promissora pela otimização do comportamento de sistemas por meio de processos evolutivos, os quais têm mostrado rapidez e robustez. A implementação computacional de métodos de simulação da evolução,



denominada *computação evolucionária*, tem proporcionado a determinação de ótimos globais para diversas classes de problemas cujas soluções eram até então desconhecidas ou insatisfatórias.

Ao longo dos anos, a comunidade científica tem desenvolvido e aprimorado ferramentas e técnicas de otimização inspiradas nos processos naturais de evolução. Um ponto-chave da computação evolucionária é a representação de uma solução ou indivíduo. Esta escolha é baseada no tipo de problema a ser resolvido e nas preferências pessoais. Assim, surgiram as seguintes subclasses da computação evolucionária:

- Programação evolucionária: Introduzida por Fogel et al. [26]. Originalmente baseada em máquinas de estado finito;
- Estratégias evolutivas (EEs): Introduzida por Rechenberg e Schwefel. Utiliza vetores com valores reais principalmente para parâmetros de otimização [23];
- Algoritmos genéticos (AGs): Introduzidos por Holland [27]. Utiliza tamanhos fixos da cadeia de bits para codificar as soluções.
- Programação genética (PG): Surgiu na década de 80. No entanto, em virtude da intensa utilização computacional necessária e dos equipamentos com reduzida capacidade de processamento disponíveis na época, somente na década seguinte ganhou força por meio dos trabalhos de Koza em 1992. Utiliza representação em forma de árvore semelhante ao que é utilizado nos compiladores como um formato intermediário entre a linguagem de programação (Java, C, etc) e o código específico da máquina.

Apesar de possuírem o mesmo algoritmo evolutivo básico, essas ramificações da computação evolucionária possuem diferenças entre si na forma como foram inicialmente concebidas.

Nesta dissertação é dada ênfase ao algoritmo de Programação Genética. Nesta revisão sobre a teoria dos sistemas inteligentes, serão destacados os Algoritmos Evolucionários e as Árvores de Decisão.

Na seção 2.5.1 é realizado um estudo sobre a programação genética que é o foco deste trabalho.

Na seção 2.5.2 são revisadas as principais características da árvore de decisão, uma vez que ela tem se mostrado bastante eficiente na descoberta de regras em base de dados.

2.5.1 Programação Genética (PG)

A computação evolucionária é uma área da ciência da computação inspirada nos princípios da evolução natural desenvolvida por Charles Darwin em 1859. Dessa forma, são utilizadas terminologias da biologia e da genética para sinalizar os procedimentos a serem executados na busca da solução de determinado problema. Esses procedimentos são utilizados para encontrar as melhores soluções utilizando computador. Os problemas para o qual a computação evolucionária pode ser aplicada devem possuir certos requerimentos, cujo principal é que a qualidade das possíveis soluções seja calculada [23].

O algoritmo utiliza um conjunto de soluções, denominado “população” e cada solução do conjunto é denominada “indivíduo”. A cada iteração os indivíduos são submetidos a modificadores simulando a evolução da população ao longo do tempo por meio da aplicação de operadores genéticos (Seleção, Cruzamento e Mutação) que simulam as modificações ocorridas na natureza em busca da melhor solução para o problema.

A Programação Genética é um desenvolvimento recente no campo dos Algoritmos Evolucionários que utiliza o paradigma dos Algoritmos Genéticos (AGs) para gerar outros algoritmos capazes de produzir soluções para um determinado problema. Um AG é um procedimento de busca aleatória trabalhando em uma população de indivíduos (soluções) codificados como uma cadeia linear de bits. [25].



A seguir, serão descritas com maiores detalhes as características dessa abordagem da computação evolucionária.

2.5.1.1 Aspectos de um Programa Indutivo

Um programa indutivo envolve a descoberta indutiva de um programa de computador que produz uma saída desejada quando é apresentada uma entrada específica. A busca por uma solução é realizada em um espaço de possíveis programas de computador [28].

Uma grande variedade de termos é utilizada em diversos campos para descrever essa idéia básica de programa indutivo. Dependendo da terminologia do campo particular envolvido, o programa de computador pode ser chamado de fórmula, plano, estratégia de controle, procedimento computacional, um modelo, uma árvore de decisão, uma estratégia de jogo, um plano de ação robótico, uma função de transferência, uma expressão matemática, uma seqüência de operações ou simplesmente uma composição de funções. Da mesma maneira, as entradas para o programa de computador podem ser chamadas de variáveis de estado, variáveis independentes, atributos, informações a serem processadas, sinais de entrada, valores de entrada, variáveis conhecidas ou ainda simplesmente argumentos de uma função. A saída de um programa de computador pode ser chamada de variável dependente, variável de controle, uma categoria, uma decisão, uma ação, um movimento, um efeito, um resultado, um sinal de saída, um valor de saída, uma classe, uma variável desconhecida ou apenas um valor retornado por uma função [28].

A grande questão gira em torno da motivação em estabelecer que a solução para estes problemas possa ser reformulada como uma busca por um programa de computador. De acordo com Koza [28], existem três razões:

- i. Programas de computador têm a flexibilidade necessária para expressar as soluções para uma grande variedade de problemas;
- ii. Programas de computador podem suportar tamanho, forma e complexidade estrutural necessárias para resolver problemas;
- iii. Programas de computador proporcionam um caminho para resolver o problema do programa indutivo.

Dessa forma, basta que os problemas sejam modelados em forma de programas para que a PG encontre uma boa solução.

2.5.1.2 O Paradigma da Programação Genética

As estruturas submetidas à adaptação no paradigma da PG são programas de computador hierarquicamente estruturados cujo tamanho, forma e complexidade podem mudar dinamicamente durante o processo. O conjunto de possíveis estruturas que passam pela adaptação é o conjunto de todas as possíveis composições de funções que podem ser montadas recursivamente a partir de um conjunto disponível de n funções $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ e o conjunto de m terminais disponíveis $T = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. Cada função f em F recebe um número específico $z(f)$ de argumentos $b_1, b_2, \dots, b_{z(f)}$. Dependendo da particularidade do problema, a função pode ser operações aritméticas (adição, subtração, multiplicação e divisão), funções matemáticas (Seno, Cosseno, Tangente, etc). Pode assumir ainda operações booleanas, funções específicas do domínio, operadores lógicos (If, Then, Else) e operações iterativas (While, For, etc) [29].

Para exemplificar, podemos considerar o conjunto de funções $F = \{AND, OR, NOT\}$ e o conjunto de terminais $T = \{D0, D1\}$. Para o nosso caso, iremos considerar que terminais serão constantes, como mostra a Figura 13.



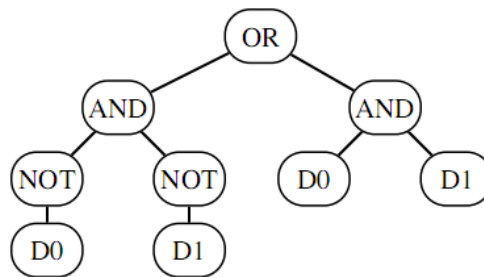


Figura 13: Expressão booleana em forma normal disjuntiva

Na árvore binária apresentada na Figura 13, os cinco nós internos da árvore são rotulados com as funções (OR, AND, NOT, NOT e AND). Os quatro nós externos (folhas) são rotulados com terminais (D0, D1, D0, D1). A raiz da árvore é rotulada com uma função (OR). Esta árvore é equivalente ao *parse tree* que muitos compiladores constroem internamente para representar determinado programa de computador [29].

É interessante notar que o conjunto de terminais e funções, utilizado neste problema específico, pode ser selecionado com a capacidade de resolver o problema, ou seja, alguma composição envolvendo as funções disponíveis e terminais poderia produzir uma solução para o problema. Caso fosse removida a função NOT do conjunto de funções F , poderia, por exemplo, criar um conjunto insuficiente de funções para expressar a função booleana e encontrar a solução.

2.5.1.3 Espaço de Busca

O espaço de busca para o paradigma da PG é o hiperespaço de expressões válidas (expressões criadas pela linguagem de programação escolhida) que podem ser recursivamente criadas por composições das funções e terminais disponíveis para o problema. Este espaço de busca pode ser visto como hiperespaço de árvores com nó raiz rotulado que possuem ramos ordenados que, por sua vez, possuem “nós” internos rotulados com as funções disponíveis e nós externos (folhas) rotulados com os terminais disponíveis [29].

2.5.1.4 Estruturas Iniciais

A geração da primeira população aleatória é iniciada selecionando-se uma das funções a partir do conjunto F de forma aleatória para ser a raiz da árvore. Quando um ponto é rotulado com uma função, que possui K argumentos, então k linhas são criadas para expandir a árvore a partir deste ponto inicial. Para cada linha criada, um elemento é selecionado de forma aleatória a partir do conjunto $C = F \cup T$ para ser o rótulo do ponto final desta linha. Se um terminal é escolhido para ser o rótulo de algum ponto então o processo está completo para esta parte da árvore. Caso uma função seja escolhida o processo continua.

A distribuição de probabilidade sobre os terminais e funções do conjunto C e o número de argumentos de cada função implicitamente determina um tamanho médio para as árvores geradas por esse processo de geração aleatório inicial [29].

2.5.1.5 Suficiência do Conjunto de Funções e do Conjunto de Terminais

De acordo com Koza [29], a propriedade de suficiência requer que o conjunto de terminais e o conjunto de funções primitivas sejam capazes de expressar uma solução para o problema. O usuário da Programação Genética (PG) deveria saber ou acreditar que alguma composição das funções e terminais fornecidos pode produzir uma solução para o problema.



A identificação das variáveis que detêm poder explanatório suficiente para resolver um problema em particular é comum, na prática, para cada problema na ciência. Dependendo do problema este procedimento pode ser óbvio ou então pode requerer um entendimento de especialistas.

2.5.1.6 Função de Aptidão (*Fitness*)

Em uma população, cada indivíduo recebe um valor de *fitness* como resultado da sua interação com o ambiente. A *Fitness* é a força que move a seleção natural Darwiniana e, de forma semelhante, os Algoritmos Evolucionários.

As regras geradas pela Programação Genética (PG), ou seja, a estrutura do indivíduo que é gerada a partir do paradigma da PG é uma consequência da *fitness*. Isto significa que a *fitness* produz a estrutura necessária que o programa precisa para evoluir [29].

2.5.1.7 Visão Geral da Programação Genética

A PG é uma técnica de aprendizado de máquina inspirada na teoria da evolução biológica. O algoritmo geralmente inicia com um grande conjunto de programas (conhecidos como população) os quais são gerados aleatoriamente ou criados manualmente para que sejam potenciais soluções. Os programas são criados para competir em alguma tarefa definida pelo desenvolvedor e ao final esses programas são ordenados por uma lista do melhor para o pior podendo, assim, selecionar o programa que melhor executou a tarefa. Cada solução, ou indivíduo, é composto de funções e terminais apropriados para o domínio do problema. Essas funções podem ser operações aritméticas, funções matemáticas, funções lógicas ou funções específicas do domínio. Dependendo do problema a ser resolvido, um programa pode ser de valor lógico, valor inteiro, valor real, valor complexo, um vetor de valores, valor simbólico ou valores múltiplos. A criação dessa população inicial é, como consequência, uma busca cega aleatória no espaço de busca do problema [28].

Após este procedimento, entra em ação processo de evolução dos programas. Os melhores programas são replicados e modificados de duas diferentes maneiras. A mutação é a mais simples e consiste em modificar certas partes do programa de forma aleatória na esperança de que este programa se torne uma solução melhor. Outra maneira de modificar o programa é através do operador de cruzamento que realiza troca de partes aleatórias dos melhores indivíduos. A Figura 14 apresenta dois indivíduos selecionados para o cruzamento. Neste procedimento é escolhida uma porção de um indivíduo e esta é substituída por uma porção de outro programa, como mostra a Figura 15, originando dois novos indivíduos, como mostra a Figura 16. Estes procedimentos de replicação e mutação criam novos programas que apesar de serem baseados em outros programas (os melhores programas) são diferentes de seus ancestrais [24]. Em cada estágio a qualidade dos programas é calculada por meio da Função de Aptidão que indica uma medida em termos de quão bom o indivíduo se comporta na busca pela solução do problema. Essa medida é denominada *fitness measure* [28].



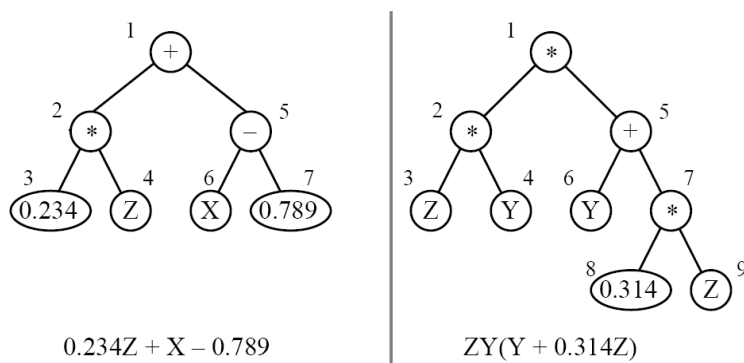


Figura 14: Dois indivíduos selecionados para cruzamento. Fonte: [28]

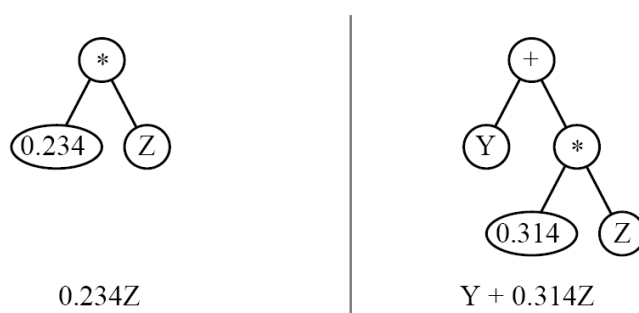


Figura 15: As partes selecionadas aleatoriamente. Fonte: [28]

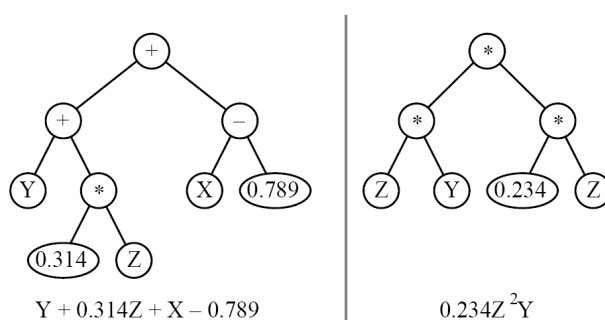


Figura 16: Dois novos indivíduos criados. Fonte: [28]

É interessante notar que no processo de cruzamento, que cria novos programas utilizando partes de programas existentes, sempre produzem programas válidos sintaticamente e semanticamente em virtude da troca completa de subárvores. Uma vez que os programas selecionados para participarem da operação de cruzamento são selecionados de acordo com a probabilidade proporcional à fitness, o cruzamento aloca as futuras buscas em áreas do espaço de busca representada por programas contendo partes promissoras.

De acordo com Koza [28], podemos elencar alguns passos que o algoritmo executa na busca da melhor solução:

- (1) Gerar uma população inicial de programas de computador aleatórios, compostos de funções primitivas e terminais do problema;
- (2) Iterativamente executar os seguintes passos até que o critério de parada seja alcançado:
 - (a) Executar cada programa na população, mensurando a qualidade de execução do programa indicada pela fitness;



(b) Criar uma nova população de programas por meio de seleção cuja probabilidade é baseada na fitness, ou seja, os indivíduos com as melhores fitness terão maior chance de serem selecionados para participarem de:

- (i) Reprodução: Copiar um programa existente para a nova população;
- (ii) Cruzamento: Criar dois novos programas a partir dos melhores selecionados e inserir na nova população.

(3) O melhor indivíduo na população, produzido durante a execução, é designado como resultado da programação genética. Este resultado pode ser uma solução (ou uma aproximação da solução) para o problema.

A Figura 17 apresenta o fluxograma do algoritmo de PG. O índice i refere-se a um indivíduo na população de tamanho nb_pop . A variável Ger representa a geração atual. Tipicamente o maior consumo de recursos computacionais está no procedimento “Avaliar fitness de cada indivíduo da população” [28].

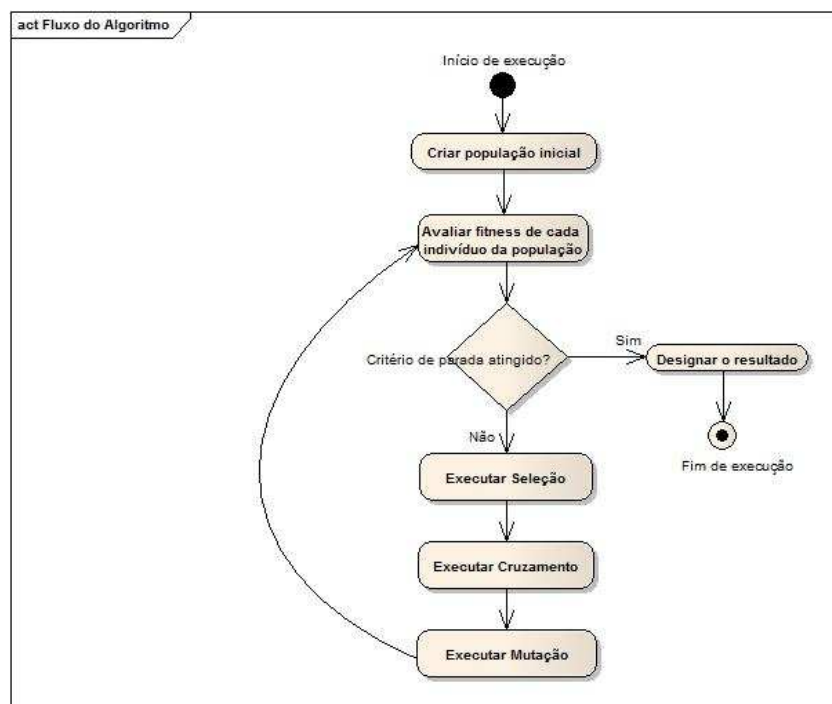


Figura 17: Fluxograma do algoritmo de Programação Genética

2.5.2 Árvore de Decisão

A classificação, que é a tarefa de atribuir objetos para uma ou várias categorias pré-definidas, é um problema que abrange diversas aplicações, como exemplo detecção de Spam em mensagens de e-mail tomando como base o cabeçalho e conteúdo das mensagens [47].

O objetivo da classificação de dados é construir ou encontrar um modelo com a finalidade de prever a categoria de um dado tomando como base algumas variáveis de predição. Esse modelo geralmente é construído usando heurísticas, como exemplo a entropia, ou algum tipo de algoritmo de aprendizado supervisionado. Provavelmente a forma mais popular para um modelo de classificação é a Árvore de Decisão [23].



Os dados de entrada para a tarefa de classificação são representados por uma coleção de registros. Cada registro, conhecido como instância ou exemplo, é caracterizado por uma tupla (x,y) , onde x é um conjunto de atributos e y um atributo especial, designado como o rótulo da classe (também conhecido como categoria ou atributo alvo). A Tabela 5 apresenta um exemplo de um conjunto de dados usado para classificar vertebrados em uma das seguintes categorias: mamífero, ave, peixe, réptil e anfíbio. O conjunto de atributos inclui propriedades de um vertebrado como sua temperatura do corpo, método de reprodução, habilidade de voar e de viver na água, entre outras. Os atributos apresentados na Tabela 5 são discretos, no entanto esse conjunto de atributos pode conter dados contínuos. Por outro lado, o rótulo da classe precisa ser um atributo discreto. Esta é a característica chave para distinguir Classificação e Regressão. Esta última apresenta como saída, um atributo contínuo [47].

Tabela 5: Conjunto de dados de vertebrados [47]

| Nome | Temperatura do corpo | Cobertura da pele | Nascimento por parto | Criatura Aquática | Criatura Aérea | Tem pernas | Hiberna | Classe |
|---------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------|------------|---------|----------|
| Humano | Sangue quente | Cabelo | Sim | Não | Não | Sim | Não | Mamífero |
| Serpente | Sangue frio | Escama | Não | Não | Não | Não | Sim | Réptil |
| Salmão | Sangue frio | Escama | Não | Sim | Não | Não | Não | Peixe |
| Baleia | Sangue quente | Cabelo | Sim | Sim | Não | Não | Não | Mamífero |
| Rã | Sangue frio | Nenhum | Não | Semi | Não | Sim | Sim | Anfíbio |
| Komodo | Sangue frio | Escama | Não | Não | Não | Sim | Não | Réptil |
| Morcego | Sangue quente | Cabelo | Sim | Não | Sim | Sim | Sim | Mamífero |
| Pombo | Sangue quente | Penas | Não | Não | Sim | Sim | Não | Ave |
| Gato | Sangue quente | Pêlos | Sim | Não | Não | Sim | Não | Mamífero |
| Leopardo | Sangue frio | Escama | Sim | Sim | Não | Não | Não | Peixe |
| Tartaruga | Sangue frio | Escama | Não | Semi | Não | Sim | Não | Réptil |
| Pingüim | Sangue quente | Penas | Não | Semi | Não | Sim | Não | Ave |
| Porco-espinho | Sangue quente | Espinho | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Mamífero |
| Enguia | Sangue frio | Escama | Não | Sim | Não | Não | Não | Peixe |
| Salamandra | Sangue frio | Nenhum | Não | Semi | Não | Sim | Sim | Anfíbio |

A Figura 18 apresenta o esquema utilizado na classificação. Neste esquema, o modelo de classificação pode ser tratado como uma caixa preta que automaticamente atribui uma classe rotulada a um conjunto de atributos de um registro desconhecido.

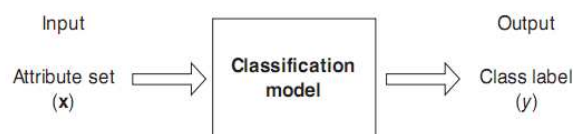


Figura 18: Classificação: mapeamento de um conjunto de atributos x em classe rotulada y [47].

Os métodos de classificação e predição podem ser comparados e avaliados de acordo com os seguintes critérios [48]:

Acúrcia: Indica a capacidade de um dado classificador indicar a que classe o registro pertence. Esse registro pode ser novo ou um dado não apresentado ao classificador anteriormente. Esse registro é uma tupla sem classe rotulada associada. A acúrcia pode ser estimada usando um ou mais conjuntos de testes os quais são independentes do conjunto de dados de treinamento.

Velocidade: Refere-se ao custo computacional envolvido na criação e utilização do classificador ou do método de predição.



Robustez: Habilidade de o método fazer previsões corretas mesmo utilizando dados com ruídos ou dados com alguns valores ausentes.

Escalabilidade: Trata-se da capacidade de construir um método que prediz de forma eficiente as classes mesmo utilizando uma grande quantidade de dados.

Interpretabilidade: Refere-se ao nível de entendimento e discernimento provido pelo método de classificação ou previsão.

Uma técnica de classificação ou classificador, é uma abordagem sistemática para construir modelos de classificação a partir de um conjunto de dados de entrada. A árvore de decisão é uma dessas técnicas que emprega um algoritmo de aprendizado para identificar um modelo que melhor se adéqua ao relacionamento entre o conjunto de atributos e a classe rotulada para o conjunto de atributos de entrada. O modelo gerado pelo algoritmo de aprendizado deveria tanto contemplar os dados de entrada quanto prever as classes rotuladas para registros não apresentados para o modelo.

Dessa forma, o objetivo chave do algoritmo de aprendizado é construir modelos com ótima capacidade de generalização, ou seja, modelos que podem prever, com acurácia, classes em registros não apresentados ao modelo.

A Figura 19 apresenta uma abordagem geral para resolver problemas de classificação. Primeiro, um conjunto de treinamento composto de registros, cujas classes rotuladas são conhecidas, precisa ser apresentado.

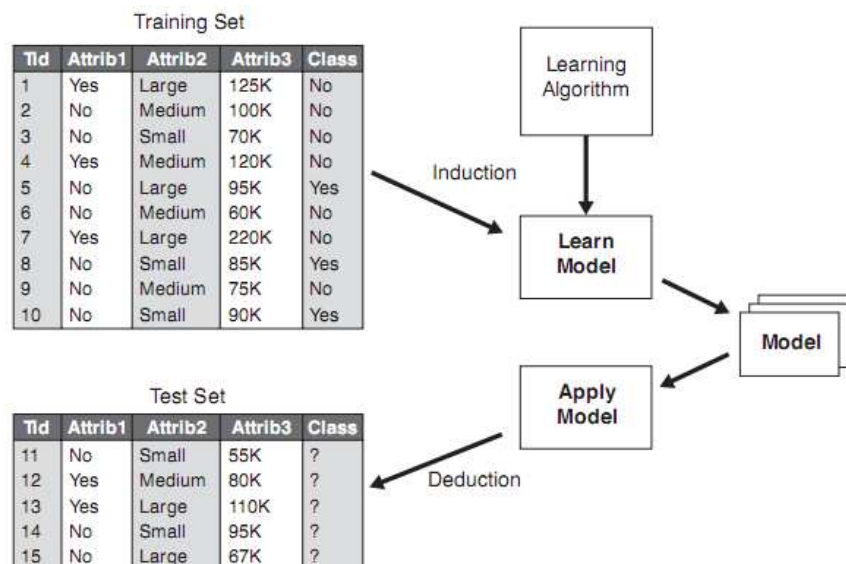


Figura 19: Construção de um modelo de classificação [47].

O conjunto de treinamento é utilizado para construir o modelo de classificação que é subsequente aplicado ao conjunto de teste o qual consiste de um conjunto de registros com classes rotuladas desconhecidas.

A avaliação do desempenho do modelo de classificação é baseada na quantidade de registros de teste corretamente e incorretamente preditos pelo modelo. Essas quantidades são organizadas em uma tabela conhecida como Matriz de Confusão.

2.5.2.1 Como Funciona uma Árvore de Decisão

Para ilustrar como a classificação utilizando Árvore de Decisão trabalha, considere uma versão simples do problema de classificação de vertebrados. Ao invés de classificar os vertebrados em cinco classes, atribuímos apenas duas categorias: mammal (mamífero) e non-mamal (não mamífero).



Suponha que uma nova espécie é descoberta por cientistas. Como podemos dizer se é mamífero ou não? Uma abordagem seria propor um questionário com perguntas referentes às suas características. A primeira questão seria relacionada à temperatura do corpo. Se o animal é de sangue frio (cold-blooded) então definitivamente não é um mamífero. Se ele é de sangue quente, ele pode ser um pássaro (bird) ou um mamífero (mammal). Neste último caso, precisamos saber se as fêmeas da espécie dão à luz (gives birth). Em caso afirmativo, são mamíferos (com exceção de alguns mamíferos que põem ovos, como o ornitorrinco e tamanduá).

As perguntas e respostas podem ser organizadas em forma de árvore de decisão que é uma estrutura hierárquica composta por nós e arestas. A Figura 20 ilustra a árvore de decisão para o problema de classificação de mamíferos.

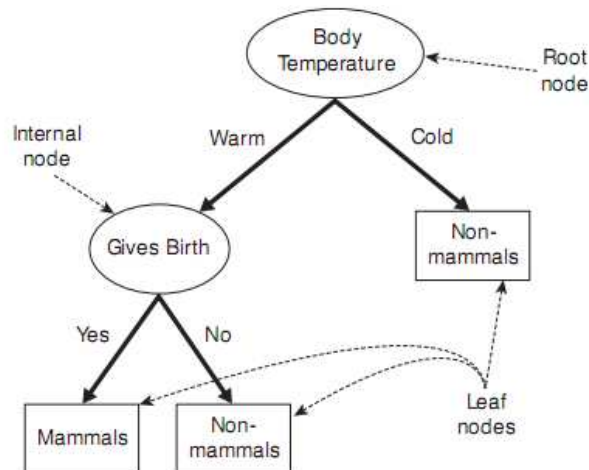


Figura 20: Árvore de decisão para o problema de classificação de mamíferos [47].

A árvore tem três tipos de nós:

Nó Raiz (Root node): Não possui arestas chegando ao nó. Possui zero ou mais arestas saindo do nó.

Nó Interno (Internal node): Cada nó que possui exatamente uma aresta chegando e uma ou mais arestas saindo.

Nó Folha ou Terminal (Leaf node): Cada nó que possui exatamente uma aresta chegando e não possui arestas saindo.

Em uma árvore de decisão, cada nó folha representa uma classe rotulada. Os nós que não são terminais (nó raiz e nós internos) contêm condições de teste de atributos para separar registros que possuem características diferentes.

Utilizando como exemplo a Figura 20, o nó raiz utiliza o atributo temperatura do corpo (body temperature) para separar os vertebrados de sangue-quente dos animais de sangue-frio. Como todos os vertebrados de sangue-frio não são mamíferos, foi criado um nó folha rotulado não-mamíferos (non mammals). Caso contrário, o fluxo segue fazendo testes nos atributos dos nós seguintes até encontrar um nó folha ou terminal. A classe rotulada associada com o nó folha é então atribuída ao registro.

2.5.2.2 Como Construir uma Árvore de Decisão

Existem diversas árvores de decisão que podem ser construídas a partir de um dado conjunto de atributos. Como algumas árvores possuem maior acurácia que outras, a tarefa de encontrar a árvore ótima é computacionalmente inviável em virtude do tamanho do espaço de busca ser exponencial.

No entanto alguns algoritmos eficientes têm sido desenvolvidos com uma acurácia razoável, embora não seja o algoritmo ótimo. Estes algoritmos geralmente empregam uma estratégia agressiva que



aumenta a árvore de decisão fazendo uma série de decisões ótimas locais em relação a qual atributo usar para particionar os dados. Um desses algoritmos é o Algoritmo de Hunt que é base para muitos algoritmos de árvore de decisão indutiva existentes, incluindo ID3, C4.5 e CART. Estes algoritmos utilizam o mesmo princípio: dividir e conquistar [48].

No final da década de 70 e meados dos anos 80, J. Ross Quinlan, um pesquisador em aprendizado de máquina, desenvolveu um algoritmo para árvore de decisão conhecido como *Iterative Dichotomiser* (ID3). Posteriormente Quinlan apresentou C4.5, que é um sucessor do ID3, o qual se tornou benchmark para os algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado [48]. Em 1984 um grupo de estatísticos (L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen e C. Stone) publicou o livro *Classification and Regression Trees* (CART) que aborda a geração de árvores de decisão binária [48].

Os algoritmos de Árvore de decisão indutiva devem fornecer um método para expressar uma condição de teste de atributos e seus resultados correspondentes para diferentes tipos de atributos. Tal procedimento deve informar como os dados de treinamento devem ser divididos.

Cada etapa do processo recursivo de crescimento da árvore deve selecionar um atributo como condição para os testes de forma a dividir os registros em pequenos subconjuntos. Para implementar este procedimento o algoritmo precisa disponibilizar um método para especificar a condição de teste para diferentes tipos de atributos, bem como uma medida de avaliação de cada condição.

A complexidade computacional do algoritmo de criação de árvore de decisão dado um conjunto de treinamento D é:

$$O(n * |D| * \log(|D|))$$

Onde,

n é o número de atributos de uma tupla em D .

$|D|$ é o número de tuplas de treinamento em D .

Isto significa que o custo computacional do crescimento de uma árvore limita-se a $n * |D| * \log(|D|)$ com $|D|$ tuplas [48].

É interessante destacar a importância da **medida de seleção de atributos**, que é uma heurística para selecionar o critério de divisão que melhor separa uma partição de dados fornecidos. Se fôssemos dividir D em partições menores de acordo com os resultados do critério de divisão, o ideal seria que cada partição fosse pura, ou seja, todas as tuplas que se enquadram em uma determinada partição devem pertencer à mesma classe. Este procedimento também é conhecido como **regras de divisão** pelo fato de determinar como os dados de um determinado nó serão divididos.

Neste contexto surge a entropia que mede a quantidade de informação. A Entropia é uma grandeza que mede a desordem tanto de objetos físicos quanto de informações. Quanto maior o grau da entropia maior é a desordem do conjunto e quanto menor, melhor a sua organização. Dessa forma, quanto menor o grau de entropia, mais apropriado é o conjunto de objetos ou de informação. Baseados no cálculo da entropia surgiram os três métodos mais populares para medir a seleção de atributos os quais são: Ganho de Informação, Razão de Ganho e Gini Index [48].

2.5.2.3 Ganho de Informação

Esta medida é baseada no trabalho pioneiro de Claude Shannon na teoria da informação, que estudou o valor ou conteúdo informativo das mensagens.

Considere um nó N que representa os registros do subconjunto D (conjunto de dados de treinamento). O atributo com maior ganho de informação é escolhido como atributo divisor para o nó N . Este atributo minimiza a informação necessária para classificar os registros nas partições resultantes e indica menor aleatoriedade ou “impureza” nessas partições. Essa abordagem minimiza o número esperado de testes necessários para classificar um registro e garante que uma árvore simples (mas não necessariamente a mais simples) é encontrada [48].



A informação necessária pra classificar um registro em D é dada por:

$$Info(D) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i)$$

Onde m é o número de clones e p_i é a probabilidade de um registro, em um subconjunto arbitrário, pertencer à classe C_i e é estimada por $|C_{i,D}|/|D|$. A função log na base 2 é usada em virtude da informação estar codificada em bits. O resultado obtido por $Info(D)$ é apenas a quantidade média de informação necessária para identificar a classe do registro no subconjunto D. Neste ponto, a informação que temos é baseada somente na proporção de tuplas de cada classe. $Info(D)$ é também conhecida como a **Entropia** de D [48].

Podemos realizar uma partição dos registros em D utilizando um atributo A com v valores distintos $\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$, como observado nos dados de treinamento. O atributo A pode ser usado para dividir D em v partições ou subconjuntos $\{D_1, D_2, \dots, D_v\}$ onde D_j contém os registros em D que possui resultados a_j de A. Estas partições corresponderiam aos ramos que se desenvolveram a partir do nó N. A situação ideal seria que as partições produzissem uma classificação exata dos registros. Neste caso as partições são consideradas “puras”. No entanto é muito provável que isto não ocorra. As partições podem conter uma coleção de registros de diferentes classes ao invés de uma única classe [48].

Neste cenário, quais informações seriam ainda necessárias para que, após a divisão, possamos chegar a uma classificação exata? Esta quantidade é medida por:

$$Info_A(D) = \sum_{j=1}^v \frac{|D_j|}{|D|} * Info(D_j)$$

O termo $\frac{|D_j|}{|D|}$ atua como um peso da partição j. O resultado obtido em $Info_A(D)$ é a informação esperada necessária para classificar um registro em D baseada na partição feita por A.

O ganho de informação é então definido como a diferença entre a soma das entropias individuais e a entropia conjunta e mede como um determinado atributo separa as amostras de treinamento de acordo com sua classificação, isto é, mede a eficácia de um atributo em relação à classificação dos dados de treinamento.

$$Ganho(A) = Info(D) - Info_A(D)$$

Em outras palavras, Ganho(A) informa o valor do ganho ao utilizar o atributo A para a divisão. O atributo com maior ganho de informação é escolhido como divisor no nó N.

2.5.2.3.1 Exemplo do Cálculo de Ganho de Informação

Serão utilizados os dados de treinamento da Tabela 6 a qual possui dados classificados escolhidos de forma aleatória da base de dados ALLEletronic. Os atributos possuem valores discretos (os valores contínuos foram generalizados). A classificação é feita por meio do atributo *compra computador* que possui dois valores distintos $\{sim, não\}$. Então existem duas classes distintas: C1=sim e C2=não, logo $m=2$. Existem nove registros da classe C1 e cinco da classe C2.



Tabela 6: Dados de treinamento da ALLElectronics (Adaptado de [48]).

| ID | Idade | Rendimento | Estudante? | Análise de crédito | Classe: Compra computador |
|----|------------|------------|------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | Jovem | Alto | Não | Razoável | Não |
| 2 | Jovem | Alto | Não | Excelente | Não |
| 3 | Meia-idade | Alto | Não | Razoável | Sim |
| 4 | Sênior | Médio | Não | Razoável | Sim |
| 5 | Sênior | Baixo | Sim | Razoável | Sim |
| 6 | Sênior | Baixo | Sim | Excelente | Não |
| 7 | Meia-idade | Baixo | Sim | Excelente | Sim |
| 8 | Jovem | Médio | Não | Razoável | Não |
| 9 | Jovem | Baixo | Sim | Razoável | Sim |
| 10 | Sênior | Médio | Sim | Razoável | Sim |
| 11 | Jovem | Médio | Sim | Excelente | Sim |
| 12 | Meia-idade | Médio | Não | Excelente | Sim |
| 13 | Meia-idade | Alto | Sim | Razoável | Sim |
| 14 | Sênior | Médio | Não | Excelente | Não |

Um nó raiz N é criado para os registros em D . Para encontrar o critério de divisão para esses registros é necessário calcular o ganho de informação de cada atributo. Primeiramente encontramos a informação esperada necessária para classificar o registro em D . Sejam:

$$C1 (\text{Sim}) = 9$$

$$C2 (\text{Não}) = 5$$

$$C1+C2 = 14$$

Logo,

$$Info(D) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i)$$

$$Info(D) = -\frac{9}{14} \log_2\left(\frac{9}{14}\right) - \frac{5}{14} \log_2\left(\frac{5}{14}\right) = 0,940 \text{ bits}$$

Em seguida é necessário calcular a informação esperada para cada atributo. Iniciando pelo atributo *Idade* é necessário verificar a distribuição de registros com resultados *sim* e *não* para cada categoria de *Idade*. Para a categoria *Jovem* existem 2 *sim* e 3 *não*. Para a categoria *Meia-Idade* existem 4 *sim* e 0 *não*. Para a categoria *Sênior* existem 3 *sim* e 2 *não*.

A informação esperada necessária para classificar o registro em D se os atributos são divididos usando atributo *Idade* é:

$$Info_A(D) = \sum_{j=1}^v \frac{|D_j|}{|D|} * Info(D_j)$$



$$Info_{Idade}(D) = \frac{5}{14} * \left(-\frac{2}{5} * \log_2\left(\frac{2}{5}\right) - \frac{3}{5} * \log_2\left(\frac{3}{5}\right) \right) + \frac{4}{14} * \left(-\frac{4}{4} * \log_2\left(\frac{4}{4}\right) - \frac{0}{4} * \log_2\left(\frac{0}{4}\right) \right) + \frac{5}{14} * \left(-\frac{3}{5} * \log_2\left(\frac{3}{5}\right) - \frac{2}{5} * \log_2\left(\frac{2}{5}\right) \right)$$

= 0,694 bits

Agora podemos calcular o ganho de informação:

$$Ganho(A) = Info(D) - Info_A(D)$$

$$Ganho(Idade) = Info(D) - Info_{Idade}(D)$$

$$Ganho(Idade) = 0,940 - 0,694 = 0,246 \text{ bits}$$

Calculando ganhos para os demais atributos temos:

$$Ganho(Rendimento) = 0,029 \text{ bits}$$

$$Ganho(Estudante) = 0,151 \text{ bits}$$

$$Ganho(Análise de crédito) = 0,048 \text{ bits}$$

Como o atributo *Idade* possui o maior ganho, é selecionado para dividir os dados. O nó N recebe o atributo *Idade* e as ramificações são criadas para cada valor do atributo *Idade*.

2.5.2.3.2 Razão de Ganho

A medida de ganho de informação usando Entropia favorece a escolha dos atributos que realizam divisão do conjunto de dados com maior número de intervalos. Para contornar essa característica da Entropia foi desenvolvido por Quinlan a Razão do Ganho com o objetivo de reduzir o peso da quantidade de classes como determinante para a escolha do melhor atributo divisor [48].

O algoritmo C4.5, sucessor do ID3, utiliza uma extensão para o ganho de informação, conhecido como *razão de ganho*, o qual aplica um tipo de normalização para o *ganho de informação*, usando valor de divisão da informação, definido por:

$$SplitInfo_A(D) = - \sum_{j=1}^v \frac{|D_j|}{|D|} * \log_2\left(\frac{|D_j|}{|D|}\right)$$

A razão do ganho é definida por:



$$\text{RazãoGanho}(A) = \frac{\text{Ganho}(A)}{\text{SplitInfo}(A)}$$

O atributo com valor máximo de razão de ganho é selecionado como atributo divisor.

2.5.2.3.3 Exemplo do Cálculo da Razão de Ganho

Neste exemplo será utilizado o atributo Rendimento. Um teste em rendimento divide os dados da Tabela 6 em três partições: *baixo*, *médio* e *alto*, contendo quatro, seis e quatro registros respectivamente. Para obter a razão de ganho deste atributo utilizamos inicialmente a equação de normalização:

$$\text{SplitInfo}_{\text{Rendimento}}(D) = -\frac{4}{14} * \log_2\left(\frac{4}{14}\right) - \frac{6}{14} * \log_2\left(\frac{6}{14}\right) - \frac{4}{14} * \log_2\left(\frac{4}{14}\right) = 1,556$$

Como calculado anteriormente, o $\text{Ganho}(\text{Rendimento})=0,029$. Podemos calcular, então, a razão de ganho:

$$\text{RazãoGanho}(\text{Rendimento}) = \frac{0,029}{1,556} = 0,018$$

Os valores calculados para os demais atributos são:

$$\text{SplitInfo}_{\text{Idade}}(D) = -\frac{5}{14} * \log_2\left(\frac{5}{14}\right) - \frac{4}{14} * \log_2\left(\frac{4}{14}\right) - \frac{5}{14} * \log_2\left(\frac{5}{14}\right) = 1,577$$

$$\text{RazãoGanho}(\text{Idade}) = \frac{0,246}{1,577} = 0,155$$

$$\text{SplitInfo}_{\text{estudante}}(D) = -\frac{7}{14} * \log_2\left(\frac{7}{14}\right) - \frac{7}{14} * \log_2\left(\frac{7}{14}\right) = 1,0$$

$$\text{RazãoGanho}(\text{Estudante}) = \frac{0,151}{1,0} = 0,151$$

$$\text{SplitInfo}_{\text{Crédito}}(D) = -\frac{8}{14} * \log_2\left(\frac{8}{14}\right) - \frac{6}{14} * \log_2\left(\frac{6}{14}\right) = 0,985$$

$$\text{RazãoGanho}(\text{Crédito}) = \frac{0,048}{0,985} = 0,048$$

O atributo com maior valor de razão de ganho é Idade, porém com um diferencial menor que o valor calculado pelo ganho de informação.

Como citado anteriormente, a razão de ganho foi desenvolvida por Quinlan com o objetivo de reduzir o peso da quantidade de classes como determinante para a escolha do melhor atributo divisor.

2.6 Conclusão

A detecção de falhas incipientes em transformadores de potência pode ser realizada de diversas maneiras. Algumas delas são utilizadas principalmente na manutenção preditiva que vem ganhando



bastante atenção das concessionárias de energia elétrica pelo seu custo-benefício bastante vantajoso em comparação com a manutenção preventiva.

Dentre as metodologias existentes, destacam-se as que utilizam dados históricos de medições e análises dos equipamentos em laboratório. Esses dados armazenados ao longo dos anos criaram um imenso volume que necessitam de ferramentas especializadas para realizar análises e gerar respostas que auxiliem os gestores na tomada de decisão.

Neste contexto surge a descoberta de conhecimento em base de dados, também conhecida como KDD (*Knowledge Discovery in Databases*) que tem como principal objetivo extrair conhecimento em grandes bases de dados. Ao longo dos anos pesquisadores têm desenvolvido técnicas para descobrir falhas incipientes utilizando os dados de cromatografia e com o avanço no campo tecnológico torna-se bastante interessante o emprego de técnicas de aprendizado de máquina para processar os dados e detectar anormalidades de forma automática, auxiliando a tomada de decisões.



3. MINERA: Framework para Descoberta de Regras em Base de Dados

A descoberta de regras em base de dados facilita a tomada de decisão e pode ser implementada por meio de Mineração de Dados voltada para a tarefa classificação. Neste trabalho foi desenvolvido um framework denominado MINERA voltado para classificação de dados utilizando algoritmos evolucionários. Esse framework foi desenvolvido utilizando Programação Genética com algumas mudanças, como processamento multi-core e utilização da razão de ganho como auxílio na criação das árvores. Estas técnicas foram apresentadas no capítulo 2.

Na seção 3.1 são relacionados trabalhos desenvolvidos na área de algoritmos evolucionários voltados para mineração de dados. Em seguida, na seção 3.2, são descritas as características do framework e a arquitetura do software desenvolvido. Na seção 3.3 é realizada a validação do framework utilizando uma base de dados de hepatite.

3.1 Trabalhos Relacionados

Neste item é realizada uma revisão bibliográfica por meio de um breve comentário a respeito de outros trabalhos desenvolvidos utilizando Algoritmos Evolucionários para Mineração de Dados.

Cattral et al. [49] publicaram um trabalho no qual foi desenvolvido um algoritmo híbrido usando Algoritmos Genéticos e Programação Genética, denominado RAGA. Este algoritmo é capaz de trabalhar com aprendizado supervisionado e não-supervisionado.

Para validação do algoritmo foi utilizada uma base de dados de polígonos com 100.000 registros gerados aleatoriamente. O algoritmo classificou corretamente 93,09%, errando a classificação em 6,91%. Comparando com os resultados obtidos com o algoritmo C5.0 percebe-se uma significativa diferença, visto que este último obteve uma taxa de acerto de 39,37%. Sua Taxa de Erro foi de 60,63% na classificação.

Elkaffas et al. [50] publicaram uma pesquisa na qual foi desenvolvido um framework para descoberta de regras em uma base de dados de empresas públicas Norte Americanas. O algoritmo consiste em detectar regras e gerar instruções em SQL, que é uma linguagem de pesquisa para banco de dados relacionais. Os resultados indicaram que o crescimento no tamanho da árvore é proporcional a acurácia nos resultados de predição.

Bhattacharyya [51] publicou um trabalho que propõe a utilização da abordagem decile-maximizing (DMAX) e procedimentos da computação evolucionária para a obtenção de um conjunto de modelos não-dominados utilizando múltiplos objetivos definidos. Trabalha com a profundidade do arquivo como parâmetro de entrada e cada indivíduo é especificado como um vetor de pesos. A fitness de cada indivíduo é calculada a partir de uma função ponderada da maximização do desempenho decil e o ajuste das soluções em relação aos dados de forma a controlar o overfitting. O propósito do seu trabalho é identificar a Fronteira Pareto de soluções não-dominadas e utilizar estes modelos de previsão em marketing direto, identificando, assim, os indivíduos mais suscetíveis de responder às solicitações promocionais ou outros programas de intervenção.

Foram explorados modelos lineares e não-lineares, sendo os modelos não-lineares dominantes em relação às suas contra-partes lineares. Os parâmetros do AG foram ajustados de forma empírica. Os seguintes valores de parâmetro foram usados: a taxa total do cruzamento é ajustada em 0,7; a taxa uniforme da mutação em 0,2, a taxa não-uniforme da mutação em 0,3 e a taxa de cruzamento em 0,6. A busca foi concluída após 100 gerações em todos os casos. Não foi informada no artigo a quantidade de indivíduos na população.

A eficácia dessa abordagem Pareto-GA quando utilizado em conjunto com um grande número de objetivos necessita de exames mais detalhados. Com o crescimento do número de objetivos, grandes



populações podem ser necessárias para uma busca adequada. Outro problema destacado é o overfitting, que é a memorização de ruídos e por consequência baixa capacidade de generalização.

Ngan et al. [52] propuseram um trabalho que combina Redes Bayesianas e Algoritmos Evolucionários com a finalidade de descobrir conhecimentos médicos. A combinação da métrica MDL (Minimum Description Length) com EP (Evolutionary Programming) foi utilizada no processo de aprendizado em redes Bayesianas. A métrica MDL mede o comprimento total da descrição de uma estrutura de rede, sendo a melhor rede aquela que possui o menor valor nesta métrica. Já o EP é um algoritmo evolucionário que enfatiza o enlace comportamental entre pais e filhos nas gerações. Utiliza somente o operador genético que realiza mutação e a representação é livre de restrições. Para descobrir regras na base de dados foi utilizada Programação Genética Genérica (Generic Genetic Programming - GGP) que é uma extensão da Programação Genética e usa uma gramática específica para controlar as estruturas. Utiliza o fator de confiança para medir a consistência da regra encontrada.

A tecnologia de mineração de dados descrita foi aplicada em um banco de dados da vida médica real, composto de dados sobre crianças com fraturas de membros, que deram entrada no *Prince of Wales Hospital* em Hong Kong durante o período de 1984 a 1996. A finalidade é a análise dos padrões de fratura em crianças.

Nos experimentos foram utilizados 50 indivíduos na população e 100 gerações. Várias regras interessantes foram descobertas envolvendo idade, sexo, diagnóstico, entre outros atributos. Usando a base de dados de fraturas em crianças, foi possível verificar, por exemplo, que pacientes do sexo feminino são mais prováveis de estarem no grupo etário mais jovem (idade 0-7). Já os pacientes do sexo masculino têm maior probabilidade de estar no grupo mais velho (idade 11-15).

Zang et al. [53] propuseram um método de detecção de falhas no isolamento de transformadores de potência utilizando Programação Genética. O método utiliza o algoritmo GROW para criar os indivíduos da população inicial. Esse algoritmo inicia com um conjunto de funções com a finalidade de adicionar nós na árvore. Aleatoriamente seleciona a raiz a partir de um conjunto de funções, em seguida preenche os argumentos da raiz com funções aleatórias e nos passos seguintes vai criando os argumentos dos nós selecionando funções aleatórias até a formação completa da árvore. A fitness é calculada pela razão Nr/Nt , onde Nr é o número de registros classificados corretamente e o Nt é o número de registros usados no treinamento.

A base de dados utilizada possui 352 registros de gases e seus tipos de falhas diagnosticadas por especialistas, dividida em cinco classes de problema. Os parâmetros utilizados na execução principal foram:

Profundidade inicial da árvore: 10

Número máximo de nós: 200

Número de indivíduos na população: 1000

Número de gerações: 1000

Conjunto de funções: {+, -, *, /}

Taxa de Reprodução: 0,1~0,2

Taxa de Cruzamento: 0,5~0,9

Taxa de Mutação: 0,1~0,5

Estratégia de Seleção: Torneio

Critério de parada: 95% ou mais de classificações corretas

Apresentou média de acurácia no diagnóstico de 91,4% superando Redes Neurais Artificiais (90,1%) e Sistemas Fuzzy de diagnóstico (89,3%)..

Podemos, então, perceber a ampla empregabilidade da mineração de dados por meio dos algoritmos evolucionários.



3.2 MINERA: Framework para Descoberta de Regras em Base de Dados

Um dos requerimentos abordados nesta dissertação é desenvolver um modelo adaptável e reutilizável, o qual permite ao desenvolvedor de aplicações realizar ajustes de acordo com as especificações do problema tratado. A reutilização de um modelo de componentes mantém o desenvolvedor, que utiliza o framework, livre do trabalho de codificar a aplicação inteira novamente. Isto faz com que seja economizado tempo, possibilitando a modificação dos componentes requeridos de acordo com suas especificações.

Os frameworks geralmente dispõem de um conjunto de classes abstratas e suas correspondentes relações com outras classes. Além disso existem ainda certas implementações fixas que mantêm toda estrutura geral do framework intacta. Ao desenvolvedor cabe o trabalho de escrever os códigos para essas classes abstratas de forma a produzir a funcionalidade requerida.

Para modelar a especificação do sistema foi utilizada a Unified Modeling Language (UML). Trata-se de uma ferramenta para especificação, visualização, construção e documentação de sistemas de software, facilitando o complexo processo de desenho do software, dividindo o projeto em projetos menores e mais detalhados, conhecidos como “*blueprint*”. Cada blueprint descreve de forma detalhada a construção de um componente particular do software. A UML disponibiliza ainda diferentes tipos de modelos para representar comportamentos do sistema. Estes modelos ajudam a entender o sistema a partir de diferentes perspectivas.

Em desenvolvimento de software, um framework de software é um projeto reutilizável de um sistema que descreve como este é decomposto em um conjunto de objetos e suas interações. Um Framework descreve o comportamento dos objetos e como esses objetos interagem. Descreve ainda a interface de cada objeto e o fluxo de controle entre os componentes.

Os Frameworks utilizam-se das três características do paradigma de Orientação a Objetos: abstração de dados, polimorfismo e herança. A abstração de dados é introduzida por meio de classes abstratas, as quais disponibilizam interfaces, sendo que as implementações dessas interfaces podem mudar. O polimorfismo permite que um objeto se modifique em tempo de execução ou que uma variável possa assumir valores de diferentes tipos. A herança torna fácil criar ou derivar novos componentes. Os benefícios básicos de um Framework são reusabilidade, modularidade, extensibilidade e inversão de controle [54].

Modularidade: Frameworks aumentam a modularidade encapsulando detalhes de implementações, disponibilizando interfaces. Isto ajuda a melhorar a qualidade do software mapeando os impactos de projeto e implementação, reduzindo o esforço requerido para entender e manter o software.

Reusabilidade: As interfaces ajudam o Framework a melhorar a reusabilidade, definindo componentes genéricos que podem ser reaplicados para criar novas aplicações. Reusabilidade pode render melhoras substanciais em produtividade, qualidade, desempenho e confiança no sistema.

Extensibilidade: Um Framework melhora a extensibilidade disponibilizando métodos baseados em templates⁶ que proporcionam à aplicação facilidade de adaptar uma aplicação de acordo com um domínio particular do problema abordado.

Inversão de controle: Na abordagem tradicional os desenvolvedores reutilizam componentes de uma biblioteca, escrevendo o programa principal que utilizam funcionalidades de componentes sempre que são necessários. O desenvolvedor geralmente decidia quando chamar os componentes e era responsável por toda a estrutura e fluxo de controle do programa. Em um framework, o programa principal é reutilizado e os desenvolvedores decidem o que será plugado no programa. O desenvolvedor

⁶ Template (ou "modelo de documento") é um documento sem conteúdo, com apenas a apresentação visual (apenas cabeçalhos por exemplo) e instruções sobre onde e qual tipo de conteúdo deve entrar a cada parcela da apresentação — por exemplo conteúdos que podem aparecer no início e conteúdos que só podem aparecer no final. Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Web_template, acessado em 20/08/2010.



pode modificar algum elemento e criar alguns novos componentes que serão plugados no sistema. Neste caso o framework decide a estrutura global e o fluxo de controle do programa.

Em geral, um framework de software é um pedaço de software que é extensível através do estilo de programação call-back⁷ [54].

Os Frameworks podem ser desenvolvidos tanto da forma convencional como orientada a objetos, no entanto a abordagem orientada a objetos é a mais utilizada. Frameworks construídos com linguagens convencionais dependem de funções ou parâmetros de procedimentos. Com a finalidade de modificar comportamento dos frameworks orientados a objetos, desenvolvedores utilizam herança para sobrescrever dinamicamente métodos em subclasses do framework.

De acordo com Pree [54], frameworks de software são constituídos por locais congelados (*frozen spot*) e locais quentes (*hot spot*). Os *frozen spots* definem a arquitetura global do sistema, ou seja, são os componentes básicos e suas relações e dificilmente são modificados. Os *hot spots* representam as partes em que os programadores usam o framework adicionando seus próprios códigos para injetar funcionalidades específicas do projeto em desenvolvimento.

Frameworks diferem de bibliotecas de classe na medida em que pré-definem uma arquitetura que modela a interação entre vários componentes. Como já mencionado, um desenvolvedor precisa adaptar as classes do framework de forma a atender as especificações do projeto. Neste caso duas abordagens são utilizadas: Caixa-preta (*Black-box*) e Caixa-branca (*White-box*).

Na abordagem caixa-preta, são disponibilizados alguns componentes prontos que podem ser utilizados no sistema quando necessários. Na abordagem caixa-branca existem implementações incompletas de classes as quais precisam ser completadas pelo desenvolvedor. A primeira abordagem remete à reutilização de implementação enquanto a segunda exige a reutilização das interfaces que serão implementadas pelo desenvolvedor. O software desenvolvido neste trabalho de mestrado utiliza abordagem caixa-branca.

3.2.1 Arquitetura do Framework

O software foi organizado em pacotes (package). O pacote `com.minera.tree` armazena as classes responsáveis por produzir uma árvore. A Figura 21 apresenta as classes utilizadas para gerar uma árvore. A classe `AbstractBinaryNode` implementa a interface `INode` e todas as demais classes iniciadas com `Node` são subclasses de `AbstractBinaryNode`, isto é, herdaram todas as características da classe-mãe, evitando duplicação de código nessas classes.

A Figura 22 apresenta as classes e interfaces responsáveis pela implementação dos operadores genéticos de cruzamento e mutação. As classes e interfaces do pacote `com.minera.factory`, mostradas na Figura 23, são responsáveis por gerar árvores utilizando as classes e interfaces do pacote `com.minera.tree`, como uma fábrica de objetos. As classes e interfaces do pacote `com.minera.entry`, mostradas na Figura 24, funcionam como ponto de entrada para o algoritmo.

⁷ Em programação de computadores, callback é uma referência a código executável, ou um pedaço de código executável, que é passado como um argumento para outro código. Isto permite uma camada de nível inferior chamar uma subrotina ou função definida em uma camada de nível superior.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Callback_\(computer_science\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Callback_(computer_science))

Acessado em 20/07/2010



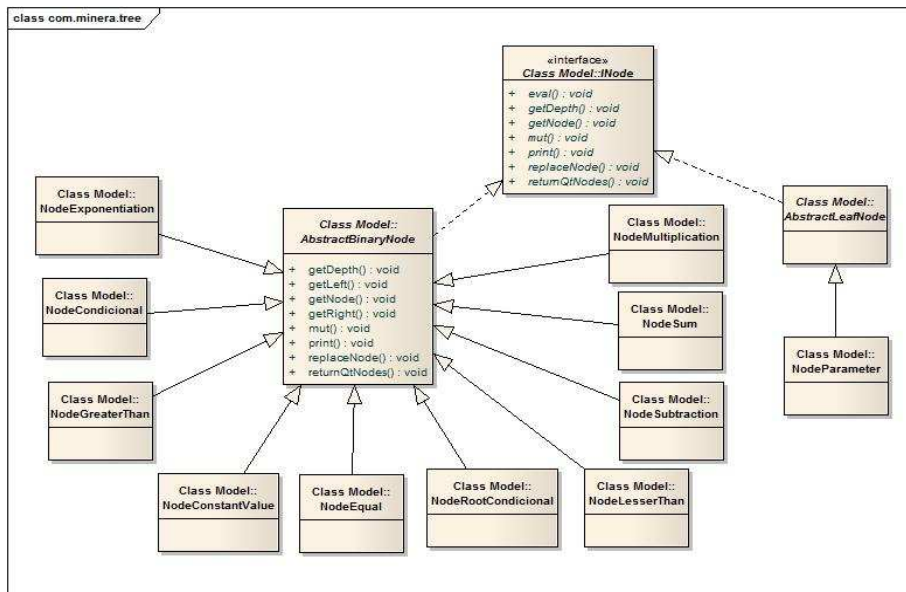


Figura 21: Classes do pacote com.minera.tree

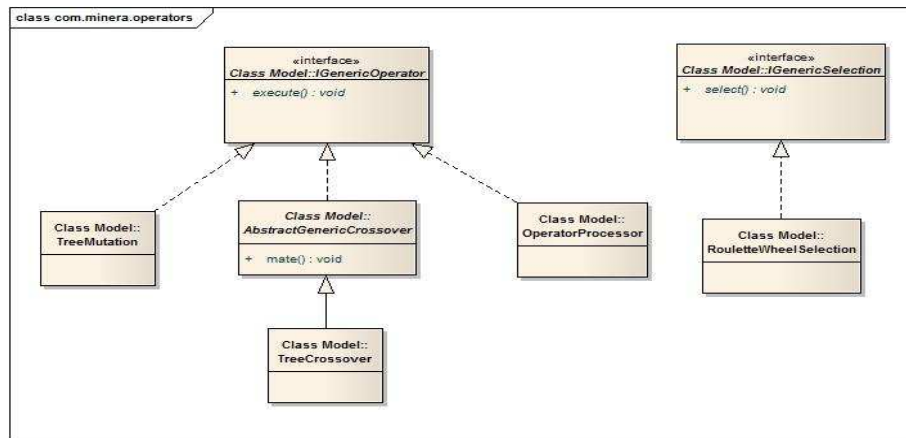


Figura 22: Classes e interfaces do pacote com.minera.operators



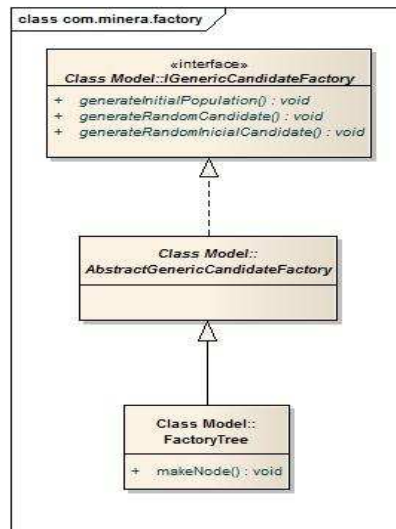


Figura 23: Classes e interfaces do pacote com.minera.factory

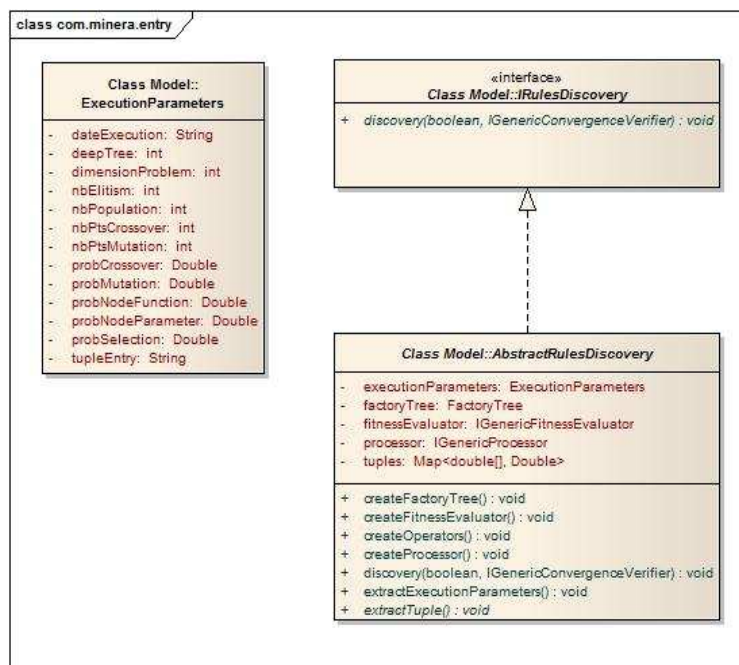


Figura 24: Classes e interfaces do pacote com.minera.entry

O algoritmo foi desenvolvido utilizando técnicas de Programação Orientada a Objetos e Padrões de Projeto, também conhecido na literatura como Design Pattern.

3.2.2 Representação do indivíduo

Um indivíduo é representado no framework como uma árvore binária, no entanto, difere da representação da árvore de decisão tradicional.

O nó raiz é sempre um símbolo de comparação que pode assumir um dos seguintes valores: maior que, menor que, igual a ou diferente.



Os nós da esquerda e direita podem ser qualquer tipo de classe que seja derivada de `AbstractBinaryNode`, como mostrado anteriormente no tópico Arquitetura do Framework. O diferencial dessa representação é que os nós terminais não são rotulados com o valor das classes, como ocorre com a árvore de decisão tradicional.

A Figura 25 apresenta a forma genérica de um indivíduo utilizado no framework MINERA. Na Figura 26 podemos visualizar um exemplo de indivíduo na qual se o valor do parâmetro 1 for maior que o valor do parâmetro 2 então o indivíduo classificou corretamente a classe a qual ele pertence, pois cada indivíduo indica uma regra para uma classe específica. Na Árvore de decisão tradicional um indivíduo pode criar regra para mais de uma classe, como apresentado na Figura 27.

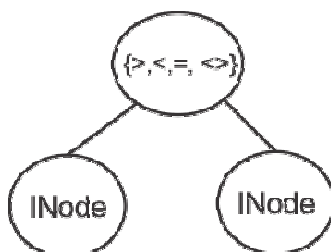


Figura 25: Representação de um indivíduo no framework MINERA.

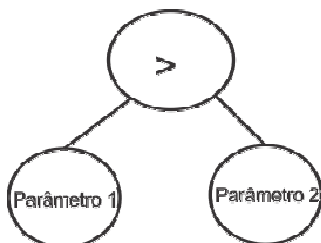


Figura 26: Exemplo de um indivíduo no framework MINERA.

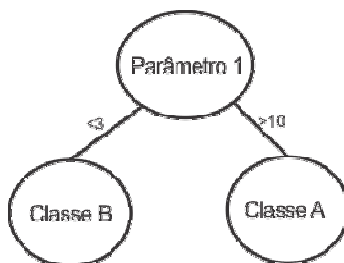


Figura 27: Exemplo de um indivíduo na Árvore de Decisão tradicional.

A vantagem dessa representação é que um indivíduo torna-se especialista por uma classe específica. Isso permite ao algoritmo buscar a melhor regra para uma classe específica ao invés de buscar diferentes regras em uma mesma árvore (indivíduo).

3.3 MINERA: Validação Inicial: Base de Dados de Hepatite

Este tópico apresenta uma descrição da base de dados utilizada para validação inicial do algoritmo. Será descrita a etapa de pré-processamento necessária para que os dados sejam utilizados pelo programa. Os dados são divididos em dois conjuntos: treinamento e validação. O conjunto de dados para treinamento do algoritmo possui 70% dos dados, enquanto que os outros 30% são destinados ao conjunto de validação. Os dados foram selecionados ao acaso.



3.3.1 Base de Dados

A etapa inicial consiste no pré-processamento dos dados. Nesta etapa os dados em formato texto são transferidos para uma base de dados controlada por um gerenciador de banco de dados. Neste projeto foi utilizado o MySQL, que é um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD), que utiliza a linguagem SQL (Linguagem de Consulta Estruturada, do inglês Structured Query Language) como interface. É atualmente um dos bancos de dados mais populares, com mais de 10 milhões de instalações pelo mundo ⁸.

No processo de descoberta de conhecimento em grandes bases de dados, conhecido como KDD (Knowledge Discovery in Databases), existem cinco etapas que fazem parte do conjunto de atividades contínuas: Seleção dos dados, Pré-Processamento para realizar a limpeza dos dados, Transformação que armazena os dados de forma adequada para ser utilizado pelos algoritmos. Em seguida vem a fase de Mineração dos dados por meio de um algoritmo escolhido, o qual fornecerá subsídios para a etapa final que é a Interpretação dos resultados obtidos.

Nas etapas de pré-processamento e transformação dos dados foi utilizada a ferramenta Spoon que faz parte da ferramenta Kettle que é constituinte do framework Pentaho (<http://kettle.pentaho.com/>). A Figura 28 apresenta a tela criada para importar os dados contidos em arquivo texto para o banco de dados.

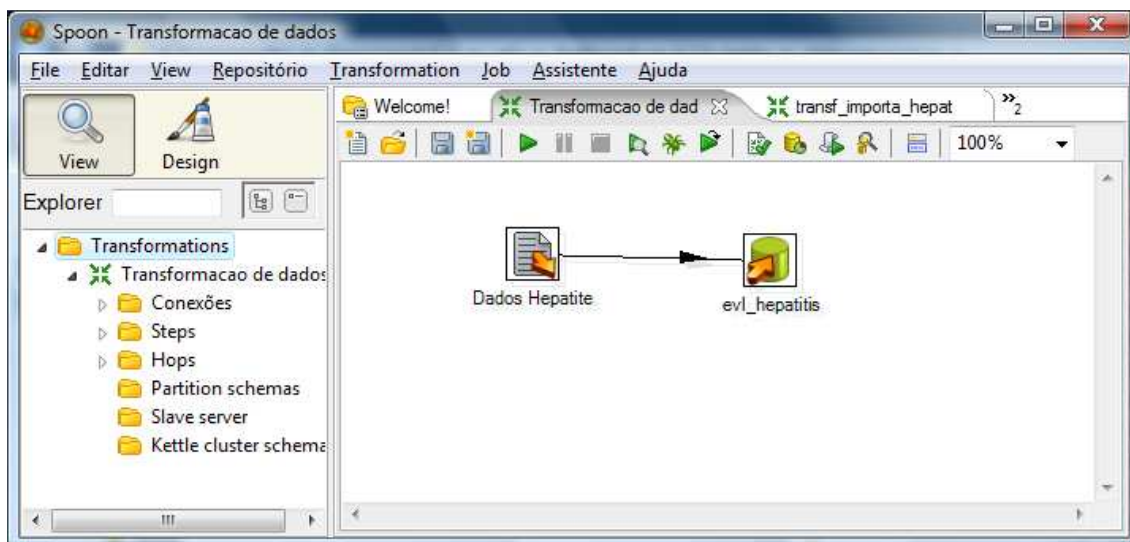


Figura 28: Transformação dos dados utilizando Kettle.

O banco de dados de hepatite foi selecionado e construído seguindo o mesmo procedimento adotado por Castanheira [55] em seu trabalho de mestrado. Foi realizado *download* dos dados disponíveis em <http://mllearn.ics.uci.edu/MLSummary.html> (acessado em 20/08/2010). Trata-se de dados da área médica contendo diagnóstico de um grupo de pessoas em relação à histologia hepatite. A base original possui 155 registros com 20 atributos, como mostra a Figura 30. A maior parte dos atributos, catorze no total, é normalizada para os valores 0 e 1. Os demais atributos são numéricos.

Alguns desses dados não possuem valores. Neste caso, o procedimento adotado foi completar os dados com a média dos valores mais próximos. Os atributos que apresentaram mais de 40% de dados vazios foram expurgados da base de dados. Ao final deste processo, a base de dados apresentou 155 registros e 19 atributos. A Figura 29 apresenta a estrutura original da tabela que armazena os dados de hepatite.

⁸ Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/MySQL> acessado em 20/08/2010.



| Field | Type |
|-----------------|--------|
| Class | double |
| AGE | double |
| SEX | double |
| STERIOD | double |
| ANTIVIRALS | double |
| FATIGUE | double |
| MALAISE | double |
| ANDREXIA | double |
| LIVER_BIG | double |
| LIVER_FIRM | double |
| SPLEEN_PALPABLE | double |
| SPIDERS | double |
| ASCITES | double |
| VARICES | double |
| BILIRUBIN | double |
| ALK_PHOSPHATE | double |
| SGOT | double |
| ALBUMIN | double |
| PROTIME | double |
| HISTOLOGY | double |

Figura 29: Estrutura original da tabela com dados de hepatite.

```
SELECT class, count(class) as quant_registros
FROM evl_hepatitis
group by class
```

| class | quant_registros |
|-------|-----------------|
| 1 | 32 |
| 2 | 123 |

Figura 30: Comando SQL para contabilizar a quantidade de registros para cada classe.

3.3.2 Parâmetros da Simulação

Os parâmetros utilizados nas simulações foram obtidos empiricamente por meio de diversas execuções. Os valores apresentados a seguir são os que apresentaram melhores resultados em simulações anteriores.

Para as simulações utilizadas como comparativos com os demais métodos, os dados foram divididos em dois conjuntos:

Treinamento: com 70% dos dados

Validação: com os 30% restantes.

Foram utilizados ainda os seguintes valores de parâmetros:

- Profundidade máxima da árvore: 8 – Indica que a árvore gerada pelo algoritmo terá, no máximo, oito níveis;

- Número de indivíduos na população: 100 – Indica que o algoritmo utilizará 100 árvores em cada execução;



- Número máximo de gerações: 500 – Indica que o algoritmo executará, no máximo, 500 iterações;
- Conjunto de funções: {+,-,*} – Representam os operadores aritméticos utilizados nos dados para descobrir regras;
- Conjunto de operadores lógicos: {>,<=,<>} – Representam os operadores lógicos utilizados nos dados para descobrir regras;
- Taxa de Cruzamento: 0,9 – Indica que duas árvores selecionadas realizarão troca de alguns nós entre si com a probabilidade de 90%;
- Taxa de Mutação: 0,05 – Indica que uma árvore tem a probabilidade de 5% de algum dos seus nós ser modificado aleatoriamente;
- Estratégia de Seleção: Roleta
- Critério de parada: 100% de classificações corretas – Significa que, ao longo das iterações (gerações), se houver alguma regra que acerte 100% das predições utilizando os dados de treinamento o algoritmo interrompe a execução, pois a melhor regra foi encontrada.

Caso não seja atingido o objetivo de 100% de classificações corretas o sistema assume como critério de parada o número máximo de gerações.

Foi utilizado ainda processamento multi-core utilizando máquina com processador de 2 núcleos.

3.3.3 Resultados

As execuções foram realizadas para cada classe em procedimentos separados. Isso se deve ao fato de que um indivíduo é especialista de uma determinada classe. Dessa forma o algoritmo realiza iterações nas classes, executando a busca de regras e somente passa para próxima classe após uma execução completa, ou seja, quando os critérios de convergência são alcançados.

A base de dados de hepatite possui apenas duas classes: Classe 1 (que indica a ocorrência de óbito) e Classe 2.

Após a execução para classe 1, o melhor indivíduo é apresentado na Figura 31. Transformando esse indivíduo em um comando SQL e executando no banco de dados podemos ver o seu desempenho retornando 28 registros, obtendo taxa de erro de 12,5%. A execução do comando SQL é apresentada na Figura 32.

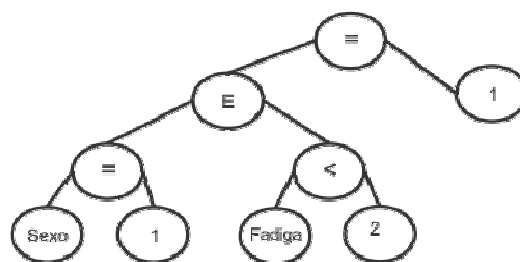


Figura 31: Hepatite - Melhor indivíduo gerado para classe 1.



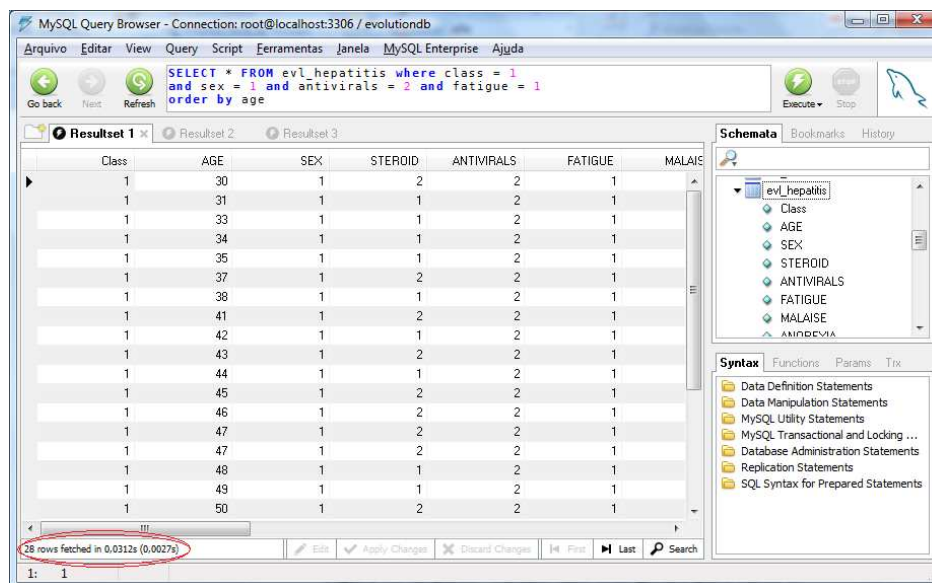


Figura 32: Execução do comando SQL para indivíduo classificador da classe 1.

Os resultados foram obtidos a partir do índice de concordância calculado por meio da implementação de uma matriz de confusão. Os resultados são apresentados na Tabela 7. A RNA obteve um índice de concordância de 73,1%; a árvore de decisão obteve um índice de concordância melhor, apresentando o valor de 80,4%. No entanto as regras encontradas pela programação genética superaram as duas ferramentas anteriores, obtendo um índice de concordância de 81,2%.

Tabela 7: Índice de concordância [55]

| | RNA (%) | Árvore de Decisão (%) | Programação Genética (%) |
|----------|---------|-----------------------|--------------------------|
| Hepatite | 73,1 | 80,4 | 81,2 |

Os valores apresentados na Tabela 7 em relação à Rede Neural Artificial (RNA) e Árvore de Decisão foram aproveitados do trabalho de L. G. Castanheira [55], a qual realizou um estudo comparativo com outros resultados encontrados na literatura e cujos resultados não foram superiores aos resultados encontrados em sua Árvore de Decisão.

Os resultados apresentados indicam somente os índices de concordância encontrados na validação dos algoritmos, ou seja, os resultados do treinamento não foram considerados. Foram realizadas 30 execuções da ferramenta MINERA e o valor apresentado corresponde ao índice de concordância obtido pela melhor regra.

3.4 Conclusão

O framework desenvolvido neste trabalho de mestrado possui algumas características peculiares as quais promoveram um melhor desempenho na descoberta de regras na base de dados.

É interessante ressaltar que sua estrutura é facilmente adaptável a diversos problemas de mineração de dados. Essa flexibilidade e robustez devem-se à sua arquitetura Orientada a Objetos a qual permite que novos componentes sejam adicionados de forma totalmente desacoplada, ou seja, um novo tipo de Nó pode ser facilmente adicionado na estrutura da árvore. Permite ainda que diversos critérios de parada



do algoritmo sejam implementados e foi concebido para ser utilizado tanto em aplicações Desktop como em aplicações Web.

Comparando os resultados obtidos na literatura com o resultado do framework, pode-se considerar que este foi igual ou superior aos demais. Dessa forma, considera-se que o algoritmo foi validado e pode ser empregado na próxima fase deste trabalho que é a descoberta de regras utilizando dados de cromatografia dos transformadores.



Laboratório de Computação Evolucionária
Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
Fone: (31) 3409 34 26
Contato: joao@cpdee.ufmg.br

4. Resultados Utilizando o Framework MINERA

No capítulo 2 foram apresentadas as características e a importância do sistema de isolamento dos transformadores para seu correto funcionamento. A maioria dos grandes transformadores de potência utiliza óleo mineral como fluido dielétrico como meio de resfriamento. Os transformadores, quando submetidos a longo tempo de serviço, estão sujeitos a estresses térmicos e elétricos os quais podem ocasionar a produção de gases que indicam o tipo de falha incipiente.

Vimos que os gases produzidos no óleo isolante durante a operação dos transformadores de potência podem ser extraídos por meio de diversos métodos, tais como Torricelli, Toepler Pump, Stripping, entre outros e a cromatografia gasosa é utilizada para analisar os gases extraídos [20].

A análise de gases dissolvidos (DGA), que é uma prática comum no diagnóstico de falhas, testa periodicamente amostras de óleo isolante para obter os gases presentes no óleo, os quais são formados pela decomposição de seu material isolante. Os principais gases relacionados às falhas incluem o Hidrogênio (H_2), Metano (CH_4), Acetileno (C_2H_2), Etano (C_2H_6), Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2).

O campo da inteligência computacional, ao longo dos anos, tem aprimorado os algoritmos de detecção de padrões em base de dados. Neste sentido, diversos algoritmos de cunho estatístico, estocásticos ou probabilísticos têm sido empregados para essa finalidade, tais como os Algoritmos Genéticos (AGs), Redes Neurais (RNAs) e Árvores de Decisão (AD).

As Árvores de Decisão possibilitam uma visualização mais fácil das regras descobertas, pois os algoritmos que geram estruturas em árvores produzem, além do resultado, uma estrutura que permite o entendimento das regras utilizadas para atingir os resultados.

O framework desenvolvido neste trabalho de mestrado utiliza Programação Genética para descobrir regras na base de dados utilizando a representação em Árvore Binária. Utiliza o aprendizado supervisionado a partir de uma base de dados de treinamento com dados pré-classificados por especialistas.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: O tópico 4.1 descreve as modificações realizadas no algoritmo de forma a obter melhor desempenho na descoberta de regras. No tópico 4.2 são apresentadas as características da base de dados utilizada no treinamento e validação do algoritmo. No tópico 4.3 são apresentados os resultados das simulações e por fim, no tópico 4.4, a conclusão do capítulo 4 é apresentada.

4.1 Modificações no algoritmo

4.1.1 Cálculo da “Fitness”

A fitness, ou função de aptidão de cada indivíduo, testa o seu desempenho na solução do problema proposto. Esse desempenho é utilizado durante o processo de seleção da estrutura na esperança de evoluí-la ao longo das gerações.

Neste trabalho, foi utilizada a Matriz de Confusão para calcular a fitness do indivíduo. Dada uma hipótese h , a matriz de confusão para esta hipótese disponibiliza uma medida efetiva do modelo de classificação por meio da razão entre o número de classificações corretas versus as classificações preditas e o conjunto de exemplos. Os resultados são totalizados em duas dimensões: classes atuais (verdadeiras) e classes preditas, para n classes diferentes $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

A Tabela 8 ilustra a matriz de confusão padrão, na qual VP indica que o classificador diagnosticou a classe como positivo e realmente era positivo; VN indica que o classificador diagnosticou a classe como negativo e realmente era negativo; FP indica que o classificador diagnosticou a classe como positivo mas



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

na verdade era negativo e finalmente FN indica que o classificador diagnosticou a classe como negativo mas na verdade era positivo.

Tabela 8: Matriz de Confusão

| Atual \ Predita | Positivo | Negativo |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Positivo | Verdadeiro Positivo (VP) | Falso Negativo (FN) |
| Negativo | Falso Positivo (FP) | Verdadeiro Negativo (VN) |

A Tabela 9 mostra que, para uma determinada classe, cada elemento $M(C_i, C_j)$, onde $i, j = 1, 2, \dots, n$, indica o número de exemplos que realmente pertencem à classe C_i mas que foram classificados como sendo da classe C_j . O número de acertos para cada classe encontra-se na diagonal principal $M(C_i, C_i)$. Os demais elementos representam erro na classificação.

Tabela 9: Matriz de Confusão de um Classificador

| Atual \ Predita | C_1 | C_2 | ... | C_n |
|-----------------|---------------|---------------|-----|---------------|
| C_1 | $M(C_1, C_1)$ | $M(C_1, C_2)$ | ... | $M(C_1, C_n)$ |
| C_2 | $M(C_2, C_1)$ | $M(C_2, C_2)$ | ... | $M(C_2, C_n)$ |
| | | | | |
| C_n | $M(C_n, C_1)$ | $M(C_n, C_2)$ | ... | $M(C_n, C_n)$ |

Para medir a qualidade de cada classificador podem-se utilizar algumas métricas como Acurácia, Sensibilidade e Especificidade.

A Acurácia pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$acc = \frac{VP + VN}{VP + FN + FP + VN}$$

A equação da Sensibilidade é dada por:

$$sens = \frac{VP}{VP + FN}$$

E por fim, a Especificidade pode ser obtida através da seguinte equação:

$$spec = \frac{VN}{VN + FP}$$

A fitness de um indivíduo, no problema de detecção de falhas incipientes em transformadores de potência, pode ser obtida pelo produto das três métricas, logo a equação utilizada neste trabalho tem a seguinte forma, cujo objetivo é sua Maximização [58]:

$$MAX f(X) = acc(X) * sens(X) * spec(X)$$

4.1.2 Suporte a Processamento Multi-Core

A evolução dos processadores passou inicialmente pelo processamento em lote onde apenas uma tarefa por vez podia ser executada. Na etapa seguinte o processador passou a contar com suporte a multiprocessamento. A complexidade computacional foi aumentando e assim foram desenvolvidos hardwares capazes de armazenar vários processadores de distribuir as tarefas entre eles. Surgem então



os sistemas multiprocessados de dois tipos: Simétricos (cada processador utiliza uma cópia do sistema operacional) e Assimétrico que necessita de um processador mestre para distribuir as tarefas. O poder de processamento é incrementado pelo aumento da frequência de operação dos processadores, exigindo transistores cada vez menores.

Essa evolução contínua na capacidade de processamento foi inspirada no trabalho de Gordon Moore que em 1965 afirmou que a capacidade de processamento duplicaria a cada 18 meses. Um transistor é constituído de silício, e no atual contexto encontra-se próximo de sua capacidade máxima de redução de tamanho. Outra questão é quanto menor forem os transistores em um circuito integrado maior sua quantidade por área e por consequência será maior a concentração de calor em virtude da dissipação de energia pela corrente elétrica circulante nos transistores. Caso essa energia não seja dissipada para o ambiente, produzirá elevadas temperaturas capazes de derreter o processador [56].

Com os processadores com vários núcleos, houve um incremento do poder de processamento dos microcomputadores. As principais vantagens são:

- Maior capacidade de resfriamento que os processadores single-core (um núcleo);
- Maior capacidade de processamento em aplicativos que executam processamento paralelo;
- Apresenta desempenho superior em programas que executam intenso processamento.

No entanto, para que sejam aproveitadas essas vantagens, é necessário que os programas sejam construídos para utilizar esses recursos. A plataforma de desenvolvimento utilizada na construção do framework MINERA foi Java JEE 5, configurada na IDE Eclipse Helios. Para utilizar os recursos de multi-core foram implementadas classes multi-threaded que verificam automaticamente a quantidade de processadores disponíveis e enviam tarefas assíncronas.

Para recuperar a quantidade de processadores, utiliza-se a seguinte trecho de código:

```
public class MulticoreProcessor<T> extends AbstractGenericProcessor<T> {
    private static final int PROCESSOR_COUNT =
        Runtime.getRuntime().availableProcessors();
    private final ThreadPoolExecutor threadPool;
    ...
}
```

Para executar as tarefas dividindo-as entre os processadores utiliza-se o seguinte trecho de código:

```
int threadUtilisation = Math.min(PROCESSOR_COUNT, population.size());
int subListSize =
    (int) Math.round((double) population.size() / threadUtilisation);
List<T> unmodifiablePopulation = Collections.unmodifiableList(population);

List<Callable<List<EvaluatedIndividual<T>>>> tasks =
    new ArrayList<Callable<List<EvaluatedIndividual<T>>>>(threadUtilisation);
for (int i = 0; i < threadUtilisation; i++){
    int fromIndex = i * subListSize;
    int toIndex = i < threadUtilisation - 1 ? fromIndex + subListSize :
    population.size();
    List<T> subList = population.subList(fromIndex, toIndex);
    tasks.add(
        new FitnessEvaluationTask(subList, unmodifiablePopulation)
    );
}
List<Future<List<EvaluatedIndividual<T>>>> results =
    threadPool.invokeAll(tasks);
```

A linha `threadPool.invokeAll(tasks)`; solicita que todas as tarefas, definidas na lista “tasks” sejam executadas. Isso faz com que todos os processadores sejam invocados para atender essa solicitação.



4.1.3 Critérios de Parada

Durante a execução do programa, após avaliar a fitness de cada indivíduo da população, são verificados os critérios de parada de execução do algoritmo. Os critérios utilizados foram:

1. 100% no índice de concordância ou
2. Número máximo de gerações atingido. Esse valor é definido na interface gráfica do programa.

Os critérios de parada foram desenvolvidos utilizando o Padrão de Projetos⁹ Observer¹⁰. É criada uma lista de critérios de parada e esses critérios são verificados sempre após a avaliação das fitness dos indivíduos.

Para criar um novo critérios basta implementar a interface `IGenericConvergenceVerifier` do framework e preencher o método `terminate`, como mostra os trechos a seguir.

```
public class FitnessVerifier implements IGenericConvergenceVerifier{
    public boolean terminate(
        GenericPopulationStatistic<?> populationData
    ){...}
}
```

4.2 Descrição da Base de Dados

Neste trabalho foram utilizadas quatro bases de dados distintas. Inicialmente foi necessário realizar tratamento dos dados, centralizando-os em tabelas criadas em uma base de dados MySQL. Para esse procedimento de transformação dos dados, foi utilizada a ferramenta de ETL Kettle que é constituinte do framework Pentaho (<http://kettle.pentaho.com/>).

Os dados foram normalizados utilizando-se a Normalização pela soma, na qual cada valor de concentração dos gases é dividido pela soma dos valores. Exemplo, digamos que as concentrações apresentem os seguintes valores:

$$H_2 = 134$$

$$CH_4 = 134$$

$$C_2H_6 = 157$$

$$C_2H_4 = 45$$

$$C_2H_2 = 0,4$$

A soma das concentrações é igual a 470,4.

Após a normalização feita, tendo como referência o valor da soma, as concentrações relativas terão os seguintes valores:

⁹ Os padrões de projeto de software ou padrões de desenho de software, também muito conhecido pelo termo original em inglês: Design Patterns, descrevem soluções para problemas recorrentes no desenvolvimento de sistemas de software orientados a objetos. Um padrão de projeto estabelece um nome e define o problema, a solução, quando aplicar esta solução e suas conseqüências.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Design_pattern, acessado em 21/07/2010.

¹⁰ O Observer é um padrão de projeto de software que define uma dependência um-para-muitos entre objetos de modo que quando um objeto muda o estado, todos seus dependentes sejam notificados e atualizados automaticamente. Permite que objetos interessados sejam avisados da mudança de estado ou outros eventos ocorrendo num outro objeto.

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Observer>, acessado em 21/07/2010.



$$H_2 = 0,284864$$

$$CH_4 = 0,284864$$

$$C_2H_6 = 0,333759$$

$$C_2H_4 = 0,095663$$

$$C_2H_2 = 0,00085$$

Metodologia de simulação

As simulações contaram com a divisão dos dados em grupos. Os dados foram divididos em 70% para treinamento e 30% para validação escolhidos aleatoriamente. Não houve balanceamento da base de dados, ou seja, não foram geradas cópias de registros para igualar as quantidades de diagnósticos.

Em todas as simulações foram realizadas 36 execuções com finalidade de se obter a melhor regra.

Base1

Esta base é conhecida na literatura como base de dados IEC. Ela contém 52 registros e 6 atributos:

Dos seis atributos, cinco indicam concentrações dos seguintes gases:

- Hidrogênio (H_2)
- Metano (CH_4)
- Etano (C_2H_6)
- Etileno (C_2H_4)
- Acetileno (C_2H_2)

O sexto atributo é o diagnóstico do especialista, cujos valores indicam falhas térmicas e elétricas, além do diagnóstico de normalidade. Os diagnósticos foram codificados em valores numéricos para facilitar a utilização na base de dados e possuem os seguintes valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Características dos dados de cromatografia da Base1.

| Código | Diagnóstico | Quantidade de Registros |
|--------------|----------------|-------------------------|
| 1 | Normal | 16 |
| 2 | Falha Elétrica | 22 |
| 3 | Falha Térmica | 14 |
| TOTAL | | 52 |

Base2

Esta base possui 224 registros e 6 atributos, os quais indicam 5 concentrações dos gases além do diagnóstico do especialista. Semelhante ao procedimento adotado para a Base1, a Tabela 11 apresenta as quantidades de registros da base.

Tabela 11: Características dos dados de cromatografia da Base2.

| Código/Classe | Diagnóstico | Quantidade de Registros |
|---------------|----------------|-------------------------|
| 1 | Normal | 84 |
| 2 | Falha Elétrica | 62 |
| 3 | Falha Térmica | 78 |
| TOTAL | | 224 |



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

Base3

Esta base possui 219 registros. Possui os mesmos atributos da base 2, os quais são distribuídos nas classes conforme apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Características dos dados de cromatografia da Base3.

| Código/Classe | Diagnóstico | Quantidade de Registros |
|---------------|----------------|-------------------------|
| 1 | Normal | 179 |
| 2 | Falha Elétrica | 13 |
| 3 | Falha Térmica | 27 |
| TOTAL | | 219 |

4.3 Resultados das Simulações

As simulações foram realizadas em ambiente com as configurações apresentadas na Tabela 14. Os parâmetros devem ser substituídos pelas concentrações dos gases de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13: Legenda dos parâmetros

| Parâmetro | Gás |
|-----------|-------------------------------|
| Param1 | H ₂ |
| Param2 | CH ₄ |
| Param3 | C ₂ H ₆ |
| Param4 | C ₂ H ₄ |
| Param5 | C ₂ H ₂ |

Tabela 14: Características do ambiente de simulação.

| Sistema Operacional | Máquina/Nº Processadores | Linguagem de programação | Servidor de Aplicações | Banco de Dados | IDE de Desenvolvimento |
|------------------------------------|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Windows Vista Home Premium 64 Bits | NoteBook Toshiba c/ Processador Intel(R) Core(TM) 2 Duo T5450 - 1,67 GHz 2GB de Memória | Java 6 (build 1.6.0_11-b03) | JBoss 4.2.3.GA | MySQL 5.1.28-rc-winx64 | Eclipse 3.4.0 |

O framework MINERA consiste em uma ferramenta para encontrar regras em base de dados, no entanto é necessária uma interface para que o usuário utilize o software de maneira fácil. Esta interface foi criada de forma que seja possível utilizar o software em ambiente WEB, acessível por meio de um browser. A tela de configuração de parâmetros é apresentada na Figura 33.



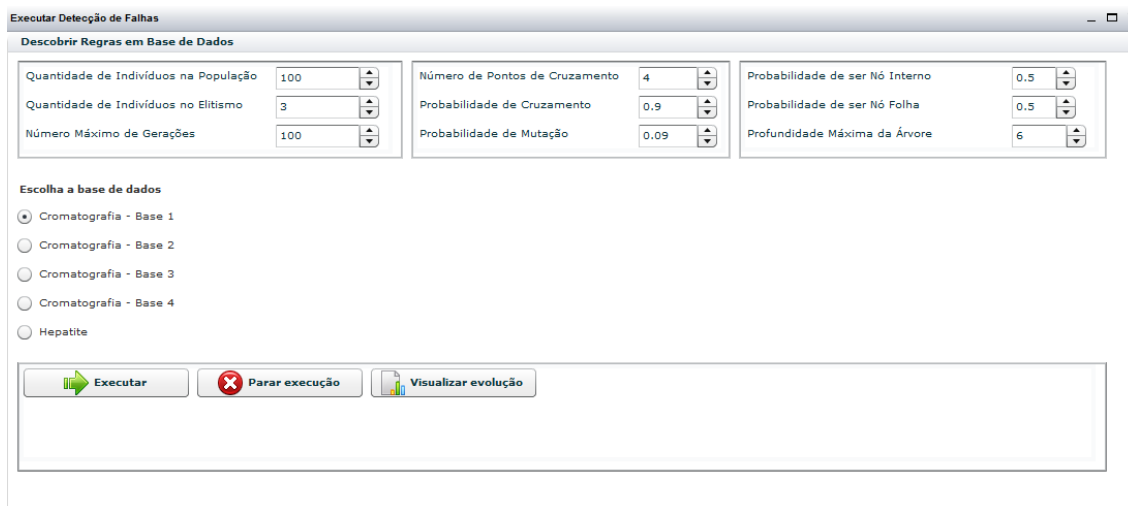


Figura 33: Parâmetros de execução das simulações.

Os resultados das simulações utilizando o framework MINERA foram comparados com os resultados obtidos e publicados na dissertação de mestrado desenvolvida por Castanheira [55], a qual utilizou os algoritmos J48 e RNA disponíveis no pacote de software de domínio público Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis), disponível em <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>.

Dessa forma, foram utilizados no presente trabalho, os mesmos procedimentos adotados por Castanheira para treinamento e validação. Estes procedimentos são listados a seguir.

- 1) Para realização das análises, os dados foram particionados da seguinte forma: 70% dos dados foram utilizados para treinamento e os 30% restantes foram empregados na validação. Esses dados são extraídos do banco de dados de forma aleatória.
- 2) Foram realizadas duas análises para classificação de falhas incipientes nos transformadores:
 - a. Primeira análise: Os algoritmos da RNA e da Árvore de Decisão (AD) foram treinados e validados com os dados da Base 1 (IEC). Após este procedimento, os dados das bases Base 2 e Base 3 foram apresentados tanto à rede neural quanto à árvore de decisão gerada. Em seguida o mesmo procedimento foi realizado utilizando a Base 1 (IEC) balanceada.
 - b. Segunda análise: Os algoritmos da RNA e da AD foram treinados e validados com os dados da Base 2. Em seguida, os dados das bases IEC e Base 3 foram apresentados à rede neural e à árvore de decisão. O mesmo procedimento foi utilizado considerando a Base 2 balanceada.

Em todas as simulações a seguir, no framework MINERA o número de iterações máximo necessário para encontrar a melhor regra foi 200, enquanto que nas outras ferramentas foram utilizadas 1.000, 4.000 e 8.000 iterações (Castanheira, pág. 75).

Análise 1

Utilizando a Base 1 (IEC) para treinamento, foram realizadas 36 simulações. A melhor regra obtida nas 36 execuções foi utilizada como resultado final.



Utilizando base desbalanceada

Podemos perceber pelas Tabelas 15 e 16 que, com exceção da classe 3, o algoritmo do framework MINERA obteve resultados superiores aos resultados obtidos pela Rede Neural. Por outro lado, o algoritmo do framework MINERA obteve resultados melhores do que a Árvore de Decisão somente para a classe 1.

Tabela 15: Resultados obtidos para RNA e AD utilizando base de dados Base 1 (IEC) desbalanceada (Castanheira, pág. 83)

| Classes | Rede Neural | | | | Árvore de Decisão | | | |
|----------|-----------------------|-----------|-------------|--------|--------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | | Erro (%) | | | |
| | Geração da Rede (IEC) | | Diagnóstico | | Montagem da árvore (IEC) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 2 | Base 3 | Treinamento | Validação | Base 2 | Base 3 |
| Classe 1 | 1,2 | 1,4 | 57,2 | 48,9 | 0,0 | 0,0 | 40,9 | 53,1 |
| Classe 2 | 9,5 | 53,2 | 50,1 | 28,5 | 6,7 | 57,1 | 32,8 | 20,0 |
| Classe 3 | 1,0 | 2,0 | 34,4 | 38,9 | 0,0 | 0,0 | 22,5 | 27,3 |

Tabela 16: Simulação 1 - Resultados do MINERA

| Classes | MINERA (Melhor Regra) | | | |
|----------|------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | |
| | Geração da Regra (IEC) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base2 | Base 3 |
| Classe 1 | 0,0 | 0,0 | 35,0 | 32,6 |
| Classe 2 | 0,0 | 0,0 | 43,3 | 21,5 |
| Classe 3 | 0,0 | 0,0 | 40,1 | 43,7 |

Para as classes 1 e 2, utilizando os dados de treinamento, ou seja, os dados da Base 1, a melhor regra classificou corretamente 100% dos dados. Isso é representado pelos erros com valor de 0% na Tabela 16.

A melhor regra obtida para as classes 1, 2 e 3 é apresentada sob a forma de uma cláusula SQL que filtra os dados no banco de dados. Essa cláusula é apresentada da seguinte forma:

Regras encontradas

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 1:

WHERE

$$((0.0953628404557274 - \text{param3}) < (((\text{param2} * (((\text{param3} - \text{param2}) - \text{param3}) * \text{param4}) * (\text{param4} - (0.3158779792300447 - \text{param3}))) + 0.3158779792300447)) * 0.0953628404557274) * (((\text{param4} * 0.3158779792300447) + (((0.0953628404557274 - ((0.0953628404557274 * (0.0953628404557274 + \text{param3})) * 0.15615669311718317)) * ((0.6510048217279365 - \text{param3}) * ((\text{param3} - (\text{param3} * (((0.11354908291802246 * \text{param5}) * 0.0953628404557274) ^ ((\text{param3} - \text{param5}) - 0.7057492633146784)))) - \text{param3}))) + (((0.6518411403338831 ^ (((\text{param3} * \text{param3}) - (\text{param3} * 0.0953628404557274)) - (\text{param2} - (\text{param1} - \text{param3}))) * 0.0953628404557274)) * 0.0953628404557274) + 0.5327024847614344))) - ((((((\text{param3} - \text{param3}) * (((\text{param4} ^ 0.16064155766007782) ^ \text{param3}) * 0.0953628404557274)) * (0.0953628404557274 * ((((((\text{param4} *$$


$$\begin{aligned}
& ((((\text{param3} - 0.0953628404557274) * (((0.0953628404557274 * (\text{param2} * ((\text{param3} * \\
& ((0.0953628404557274 - \text{param3}) * \text{param4})) - \text{param3}))) * 0.13527898037126274) * \text{param5})) - \\
& (((((0.6510048217279365 - \text{param3}) * (\text{param1} + \text{param5})) * (((\text{param5} * (((((\text{param3} - \\
& ((0.0953628404557274 - ((\text{param4} - \text{param3}) * (\text{param3} * (((((0.0953628404557274 * \\
& (0.49649678696985355 - \text{param3})) - 0.9547984329996587) * (\text{param3} * 0.49649678696985355)) * \\
& 0.3948070586225466) * (\text{param2} - \text{param2})))))) + (\text{param3} - 0.0953628404557274))) - (((\text{param1} \wedge \\
& \text{param3}) + \text{param4}) * \text{param3})) * \text{param3}) - \text{param5}) * (\text{param1} - \text{param3}) + 0.3158779792300447)) * \\
& 0.3158779792300447) * (0.8300424679095243 + \text{param3})) * \text{param3}) - \text{param1}) - (\text{param3} + \text{param3})) \\
& - \text{param3}) * (((\text{param1} * (\text{param3} - 0.0953628404557274)) + 0.6510048217279365) * ((\text{param1} - \\
& \text{param3}) * (0.0953628404557274 * \text{param5}))) * (0.11354908291802246 - (((\text{param3} - \text{param2}) * \\
& (((((0.49649678696985355 + (0.0953628404557274 - ((\text{param3} - ((0.11354908291802246 - \\
& (0.49649678696985355 * \text{param3})) * (0.0953628404557274 - 0.2832820491784023))) - \\
& (0.3097731545990977 + ((\text{param5} + ((0.461055974085935 + (((\text{param3} * ((\text{param3} + \\
& (((0.0953628404557274 - \text{param3}) * 0.3158779792300447) * \text{param3})) + (\text{param5} * \\
& (((0.3158779792300447 - \text{param3}) - \text{param3}) - \text{param1})))) * 0.0953628404557274) - \text{param3})) \wedge \\
& 0.11354908291802246)) * \text{param3})))) * (0.11354908291802246 + (0.2276046105628995 \wedge ((\text{param3} - \\
& \text{param3}) * ((\text{param3} * 0.08979972465745434) * \text{param3})))) - (((\text{param1} * 0.49649678696985355) * \\
& 0.0953628404557274) * ((0.0953628404557274 * 0.0953628404557274) - (0.07168239006367205 * \\
& 0.0953628404557274))) * (0.17404252455799296 - ((0.3948070586225466 * 0.12707255063939926) * \\
& \text{param3}))) * \text{param3}) * (0.17404252455799296 - \text{param3}) - 0.0953628404557274)) - \text{param3}))) - \\
& 0.0953628404557274))) * (\text{param3} + 0.3158779792300447)) - \text{param3}) * 0.0953628404557274) * \\
& 0.0953628404557274))))))
\end{aligned}$$

A evolução da fitness é apresentada na Figura 34. Podemos perceber que a melhor regra foi obtida na geração de número 72, ou seja, com 72 iterações a melhor regra foi descoberta.

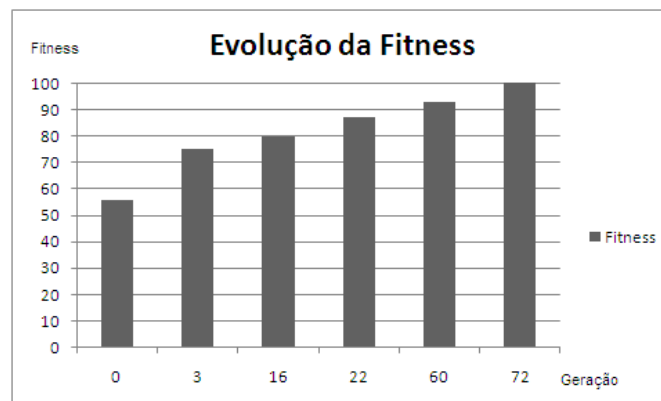


Figura 34: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 2:

WHERE

$((0.935148780485996 * (0.7905877126370588 * \text{param5})) > \text{param3})$

Utilizando os dados de treinamento, ou seja, os dados da Base 1, essa regra classificou corretamente 100% dos dados. Esta regra foi encontrada na 1ª iteração.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 3:

WHERE



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

$$\begin{aligned}
& ((((((param2 + (param1 \wedge ((((((param5 - param5) * param1) * (((0.17332716237127277 + \\
& ((0.5735635956051055 * (((param2 * (0.7990742348302046 + param5)) + 0.3311500573391055) - \\
& (0.6562324018201807 \wedge (param5 + ((param5 * 0.6582570816426331) + ((0.17628326714495768 * \\
& (param2 - 0.391036334681521)) + (((((((param2 + (param1 \wedge ((param1 \wedge ((param2 + (param2 - param5)) \\
& * ((param2 * (param3 \wedge param1)) \wedge (0.9921546290302689 * ((0.5659474623945681 * param1) \wedge \\
& 0.26807594457292716)))) * 0.41542382486938534))) * param4))) + (0.8324892824762938 * \\
& (0.37732750532988313 * (((0.17628326714495768 * 0.17628326714495768) - param2) * param5)))) * \\
& (param4 + (param2 - param1))) * 0.17332716237127277) \wedge 0.17628326714495768) + ((param2 * \\
& (0.7990742348302046 + (param1 * 0.2620938021627368))) * param4)) * 0.17332716237127277) + \\
& param2)))) * param2)) * param2)) * param3) + param2)) + ((0.17628326714495768 \wedge \\
& ((0.2620938021627368 - (param2 * (((param2 * (((((0.3311500573391055 * param2) - param5) * \\
& param2) - 0.2620938021627368) + (0.6582570816426331 * (((param5 * (param2 + param2)) \wedge (param2 \\
& * (param3 * param1))) + (0.17628326714495768 + 0.5735635956051055)) \wedge (0.8657541357894343 \wedge \\
& param3)))) - (param2 * ((param2 * (param3 * param1)) + (param2 * param3)))) + (0.6582570816426331 \\
& * ((param2 + ((param2 + param3) + 0.5735635956051055)) \wedge (param2 * (0.7990742348302046 + \\
& ((0.17332716237127277 + ((0.14031796687144427 * ((0.14031796687144427 * \\
& (((0.17628326714495768 * 0.17628326714495768) - (0.6562324018201807 \wedge (param5 + ((param5 * \\
& 0.6582570816426331) + ((0.17628326714495768 * (param2 - 0.5735635956051055)) + param2)))) * \\
& param2)) * param2) * param2)) * param2)) * param5)))) * (param3 * param2)) * \\
& 0.5370828252228533) \wedge 0.2620938021627368) \wedge ((param2 - (param5 * (param2 - \\
& (0.17628326714495768 * (param5 * param2)))) * ((param3 \wedge (param2 * 0.17628326714495768)) * \\
& 0.41542382486938534))) * 0.061416641448060805))) + (0.8324892824762938 * \\
& (0.37732750532988313 * ((0.8324892824762938 \wedge ((param2 * param1) + param2)) + \\
& (0.17628326714495768 * ((0.9635431420691608 \wedge (0.17628326714495768 * (param2 * \\
& ((0.7984504328949636 * (((param3 \wedge 0.7990742348302046) + (0.0796725868702215 - param5)) \wedge \\
& (((0.44821579547708545 * (((0.17628326714495768 \wedge param5) * param4) * param5)) * \\
& 0.17628326714495768) * (param1 * 0.9020041822387558)))) * (((param1 + param2) \wedge \\
& 0.17628326714495768) * 0.17332716237127277)))) * (((0.17628326714495768 - \\
& (0.2620938021627368 * 0.19327898762422513)) * ((0.17628326714495768 * 0.17628326714495768) - \\
& (0.6562324018201807 \wedge (((((((0.17628326714495768 \wedge param1) + (((param5 * \\
& 0.09872507157266697) + 0.17628326714495768) * (param2 + param2)) + (((param4 \wedge \\
& 0.11637844983153245) + (0.13499849831064203 * param1)) + ((param2 * 0.368167550612873) + \\
& 0.443860989395804)) - param5)) \wedge (((((((param5 - param2) * param3) * param1) + \\
& (((0.43008858132567684 * param2) * param5) \wedge param1) * 0.5370828252228533)) \wedge (param1 \wedge \\
& (((param2 * ((param5 + param2) \wedge param2)) + ((0.0796725868702215 + param2) \wedge (((param1 * \\
& (param2 + param1)) \wedge (param1 \wedge (((0.17628326714495768 * (param5 \wedge 0.2620938021627368)) - \\
& (0.6562324018201807 \wedge ((param2 * (((((((0.43008858132567684 * param2) - (param2 * \\
& ((0.7990742348302046 - param3) + (0.6582570816426331 * ((param2 + (0.17628326714495768 + \\
& param2)) \wedge param1)))) * (param3 * param5)) * (param2 + (((0.6562324018201807 \wedge \\
& 0.7990742348302046) + ((param5 * param2) * 0.5370828252228533)) + param2))) + (((param2 * \\
& 0.37732750532988313) * param2) + (((param2 + param2) + param4) * (0.0796725868702215 * \\
& (0.2620938021627368 - (param2 + (0.7990742348302046 * ((param5 + param5) * param2)))))) * \\
& ((0.6582570816426331 * (param3 * (param5 * 0.44821579547708545))) \wedge 0.17628326714495768)) - \\
& (((0.17628326714495768 * 0.17628326714495768) - (param1 * (param5 - 0.061416641448060805))) * \\
& param2) + (((param2 * ((param2 * 0.16577342247956772) + ((0.7990742348302046 * (((param2 * \\
& (((param5 - param5) \wedge (param2 \wedge (param2 * param2))) * (param1 \wedge ((param5 * 0.09872507157266697) \\
& + 0.17628326714495768))) * ((0.7990742348302046 + ((0.14031796687144427 * (param2 \wedge param4)) * \\
& (((param3 * (param4 - (param3 * param2))) + (param1 + 0.0796725868702215)) + (param2 * \\
& ((0.17628326714495768 + ((0.17628326714495768 \wedge (((param2 * 0.3311500573391055) * \\
& 0.8324892824762938) + (0.17628326714495768 * 0.17332716237127277))) * (param2 - \\
& (0.17628326714495768 * param1))) \wedge param1))) - param2) + param2))) + param2)) + param3)) + \\
& param5) * (param2 * ((param2 + (param1 + param2)) \wedge param2))) + param2) * 0.13499849831064203)) \\
& * (0.09872507157266697 + param1))) - (0.17628326714495768 - (param2 \wedge 0.17628326714495768))) * \\
& 0.9020041822387558) * param2) * 0.37732750532988313) \wedge (param5 * (param3 * param1))) - \\
& (0.2620938021627368 * 0.19327898762422513)) * param2)) * 0.44821579547708545) -
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& 0.6582570816426331))) * \text{param2})) \wedge ((\text{param2} + ((\text{param5} * (\text{param5} - (((((((0.0796725868702215 - \\
& ((((((\text{param5} - \text{param5}) * \text{param1}) * 0.7812880950971317) + ((0.17628326714495768 \wedge \\
& ((0.2620938021627368 - (\text{param2} * ((\text{param1} - (\text{param2} \wedge (\text{param5} * ((\text{param1} - (\text{param2} * \\
& (0.24026201899197086 + 0.14031796687144427)))) + (0.9020041822387558 * (\text{param2} * \\
& 0.3311500573391055)))))) + (\text{param2} * ((\text{param2} + ((\text{param2} + (((\text{param2} * 0.3311500573391055) \wedge \\
& 0.2620938021627368) + (0.7990742348302046 + \text{param5})) \wedge \text{param1})) + (\text{param2} * (\text{param2} * (((\text{param5} \\
& - (((\text{param2} - (0.7812880950971317 * 0.16577342247956772)) * (((0.2620938021627368 * \\
& 0.17628326714495768) * ((\text{param2} \wedge (((\text{param5} + \text{param5}) * ((\text{param2} * \text{param5}) + \text{param1})) + \\
& ((0.17628326714495768 * (\text{param5} + \text{param2})) + 0.5735635956051055))) \wedge 0.9020041822387558)) \wedge \\
& (0.09264055264826576 * (((\text{param2} * (0.6582570816426331 * ((0.3122244382257753 + \text{param2}) \wedge \\
& (0.57352563396681 \wedge \text{param2})))) * 0.4383000200781011) * (\text{param5} * 0.3311500573391055)) * \\
& (((\text{param5} * (0.7990742348302046 * \text{param1})) + 0.17332716237127277) - ((\text{param2} * \\
& (0.7990742348302046 + (\text{param5} * \text{param5}))) + 0.3311500573391055)) * (((0.3311500573391055 \wedge \\
& \text{param5}) + (((\text{param1} \wedge 0.3311500573391055) + 0.0796725868702215) - \text{param3}) * \\
& 0.9020041822387558)) * (\text{param2} * 0.17628326714495768))) * 0.44821579547708545)))) * \text{param5}) * \\
& ((\text{param1} + (\text{param2} \wedge \text{param2})) + \text{param2})) + (\text{param2} - 0.17628326714495768)) * (\text{param2} + \\
& \text{param2})))) \wedge \text{param1})))) * (\text{param3} * \text{param2})) * (((\text{param2} - (0.7812880950971317 * \text{param2})) * \\
& (((((0.9020041822387558 + (0.3311500573391055 * ((0.44821579547708545 * (((0.6582570816426331 \\
& * (0.13499849831064203 * \text{param2})) + 0.5370828252228533) \wedge (0.16577342247956772 + \text{param1}))) * \\
& 0.17628326714495768))) \wedge (0.17332716237127277 * \text{param2})) \wedge 0.17628326714495768) + \\
& (0.17628326714495768 * (\text{param1} + (((((((\text{param2} + 0.0796725868702215) * (0.6582570816426331 * \\
& (\text{param2} * (0.2620938021627368 * \text{param2})))) + \text{param2}) + ((\text{param1} - (\text{param3} * \\
& 0.8324892824762938)) + \text{param2})) * (((((0.6653523051267027 \wedge ((0.2620938021627368 * \\
& (0.17628326714495768 * \text{param5})) * (((((\text{param3} * \text{param2}) \wedge (((\text{param1} * \text{param1}) * \text{param2}) - \\
& (\text{param2} \wedge \text{param1})) * 0.17628326714495768)) + \text{param1}) - 0.2620938021627368) * ((\text{param1} + \\
& ((\text{param2} * \text{param2}) * ((0.0796725868702215 - ((\text{param2} - 0.9020041822387558) * (((\text{param2} * \\
& \text{param1}) + 0.3311500573391055) * (\text{param2} - \text{param5})) * \text{param2}) \wedge ((\text{param5} * (\text{param2} \wedge (\text{param2} + \\
& \text{param2} * 0.3311500573391055)))) * (((\text{param2} \wedge ((0.2620938021627368 - (\text{param1} * \\
& 0.3382206264513826) * ((\text{param4} + (\text{param2} - \text{param1})) * ((\text{param3} * 0.41542382486938534) + \\
& 0.443860989395804)))) \wedge 0.17628326714495768) + \text{param5}) * (((0.2620938021627368 - ((\text{param5} - \\
& 0.5370828252228533) * \text{param1})) + ((0.13499849831064203 - \text{param1}) * (0.21976006528416336 - \\
& 0.17628326714495768))) * \text{param2})))) * 0.17628326714495768))) \wedge \text{param2})) + ((\text{param2} * \\
& (0.2849109258577922 + \text{param5})) + \text{param1})))) + \text{param1}) - (0.2620938021627368 * \\
& 0.19327898762422513)) * ((0.17628326714495768 * 0.17628326714495768) - (0.6562324018201807 \wedge \\
& (((\text{param1} * \text{param2}) + 0.8663161280858346) * \text{param5})) * 0.44821579547708545) - (\text{param5} * \\
& (\text{param2} * 0.16577342247956772)))) * 0.17332716237127277)) * ((0.3122244382257753 + \text{param2}) \wedge \\
& (\text{param2} \wedge (((0.17628326714495768 * (((\text{param5} * 0.2620938021627368) + (0.2620938021627368 * \\
& ((\text{param5} \wedge (\text{param3} * \text{param5})) + \text{param2}))) \wedge (\text{param5} * \text{param5}))) - (0.6562324018201807 \wedge \text{param5})) \\
& * (0.6388735754351531 \wedge 0.008687821632969328)))) * (\text{param1} + \text{param1})))) * ((\text{param2} - \text{param5}) * \\
& 0.17332716237127277)) * \text{param1}))) \wedge (\text{param1} \wedge (((0.17628326714495768 * (\text{param5} \wedge \\
& 0.44177282197974566)) - (0.6562324018201807 \wedge (((\text{param2} * \text{param5}) * 0.44821579547708545) - \\
& 0.6582570816426331))) * \text{param2})) \wedge (((0.9020041822387558 + \text{param1}) + (\text{param1} - \text{param1})) * \\
& 0.13499849831064203))) * 0.8303050270933497) + \text{param1}) - (0.2620938021627368 * \\
& 0.19327898762422513)) * ((0.17628326714495768 * (((\text{param2} * 0.17628326714495768) * \\
& 0.44821579547708545) - (\text{param5} * (((\text{param2} * (0.6882453791065486 \wedge (\text{param5} + \\
& (0.7984504328949636 \wedge (((0.17628326714495768 + (((((((\text{param2} + \text{param2}) + \text{param4}) + \\
& (0.13499849831064203 * (((0.7990742348302046 \wedge ((\text{param2} - (((0.7990742348302046 * (((\text{param2} * \\
& 0.37732750532988313) * \text{param2}) + (\text{param2} * ((0.6582570816426331 * (\text{param3} * (\text{param5} * \\
& 0.44821579547708545))) \wedge 0.17628326714495768))) - (((0.17628326714495768 * \\
& 0.17628326714495768) - (\text{param1} * (\text{param5} - 0.061416641448060805))) * \text{param2}))) * (\text{param2} + \\
& \text{param5})) * \text{param3})) \wedge \text{param2})) + (\text{param5} + \text{param2})) \wedge 0.17628326714495768))) * \\
& (0.17628326714495768 * (((\text{param2} + (\text{param1} \wedge ((0.7990742348302046 * (\text{param1} \wedge \\
& 0.44821579547708545)) * \text{param4}))) + (0.8324892824762938 * (0.37732750532988313 * \\
& ((0.8324892824762938 \wedge \text{param2}) + (\text{param5} * (\text{param2} * (\text{param5} \wedge \text{param1})))))) * (\text{param4} + \text{param2})) \\
& * 0.17332716237127277) \wedge \text{param5}))) + \text{param5}) + \text{param4}) \wedge (\text{param2} * 0.391036334681521)) +
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& \text{param2})) + ((\text{param2} * 0.17628326714495768) * (\text{param4} + ((\text{param1} * (((0.6653523051267027 \wedge \\
& ((0.2620938021627368 * (0.17628326714495768 * \text{param5})) * (((((\text{param3} * \text{param2}) \wedge (((\text{param5} * \\
& \text{param1}) * \text{param2}) - (0.6562324018201807 \wedge \text{param1})) * 0.17628326714495768)) + \text{param1}) - \\
& 0.2620938021627368) * ((\text{param1} + ((\text{param2} * \text{param2}) * ((\text{param2} - ((((((\text{param2} - \\
& (0.13499849831064203 * \text{param2})) * 0.17628326714495768) + 0.3311500573391055) - \\
& ((0.0796725868702215 - (0.17628326714495768 + \text{param3})) * ((0.7990742348302046 * ((\text{param2} * \\
& (0.7990742348302046 + ((0.17628326714495768 * (\text{param5} + 0.2620938021627368)) * \\
& 0.17628326714495768))) + 0.3311500573391055)) + ((\text{param2} * (((0.6562324018201807 \wedge (((\text{param2} * \\
& (0.443860989395804 \wedge (\text{param1} * (\text{param1} + \text{param1})))) + (\text{param1} * (\text{param2} - ((0.2620938021627368 \wedge \\
& 0.7990742348302046) * \text{param2})))) * \text{param5})) + (0.7984504328949636 - (((((\text{param2} + (\text{param1} \wedge \\
& ((\text{param2} \wedge ((\text{param2} + (((0.17628326714495768 * (0.7984504328949636 \wedge 0.17628326714495768)) * \\
& \text{param1}) * (0.4567886882625959 - (((((((0.6562324018201807 - (0.17628326714495768 + \text{param3})) * \\
& (\text{param3} * \text{param5})) * \text{param2}) + \text{param1}) - (0.2620938021627368 * 0.19327898762422513)) * \\
& ((0.17628326714495768 * \text{param2}) - (\text{param2} + \text{param3}))) * 0.17332716237127277) * (\text{param2} \wedge \\
& \text{param2})))) - \text{param5})) * ((\text{param1} \wedge (\text{param5} * 0.17628326714495768)) * 0.41542382486938534))) * \\
& 0.061416641448060805))) + 0.2620938021627368) * (\text{param4} + (\text{param2} - \text{param1})) * \\
& 0.17332716237127277) * \text{param2}))) \wedge \text{param3})) * (\text{param2} * (0.24026201899197086 + \\
& 0.14031796687144427)))) * (0.7990742348302046 \wedge (\text{param2} \wedge \text{param5})) * (\text{param5} \wedge (\text{param5} * \\
& (\text{param2} * (\text{param2} + 0.17628326714495768)))) * (((0.9020041822387558 * ((\text{param2} * \\
& 0.17332716237127277) * \text{param2})) * \text{param1}) + ((((((0.8324892824762938 * (((0.17628326714495768 \\
& \wedge 0.947790909167179) + \text{param1}) \wedge \text{param2})) + \text{param2}) \wedge 0.3311500573391055) + \\
& 0.0796725868702215) - \text{param3}) * 0.9020041822387558) + \text{param2})))) * 0.17628326714495768))) \wedge \\
& \text{param2})) + (\text{param2} * (\text{param2} * 0.13499849831064203)))) \wedge \text{param4}) + \text{param5}) * \text{param2})) * \\
& 0.41542382486938534)))) * (\text{param2} + (0.17628326714495768 * \text{param2})))) + ((\text{param5} * \\
& 0.2620938021627368) * 0.17628326714495768)))) * (((0.17332716237127277 * \text{param1}) + \text{param1}) * \\
& \text{param1}) * (0.6858667831428182 * (((0.561554605081928 * \text{param2}) * 0.17628326714495768) + \\
& \text{param2})))) + \text{param1})))) - (0.24026201899197086 + 0.14031796687144427))) * (((\text{param2} * \\
& (0.443860989395804 \wedge \text{param1})) + (\text{param1} * (0.18178978915678068 \wedge \text{param1}))) * \text{param5})) * \\
& \text{param5}))) - \text{param1})) * ((\text{param3} \wedge (0.7990742348302046 * 0.17628326714495768)) * \\
& 0.41542382486938534))) * 0.061416641448060805))) + (0.8324892824762938 * ((\text{param5} * \\
& 0.17628326714495768) * ((0.8324892824762938 \wedge \text{param2}) + (\text{param5} * (\text{param2} * \\
& 0.16577342247956772)))))) * (\text{param4} + (\text{param2} - \text{param1})) * (\text{param2} + \text{param3}))) \wedge \\
& 0.14031796687144427) + (((0.443860989395804 \wedge \text{param2}) + (0.8957859630762287 * \\
& 0.443860989395804)) + \text{param2})) - \text{param3}))) \wedge ((0.6582570816426331 * 0.443860989395804) + \\
& \text{param2})) + (0.17628326714495768 + 0.5735635956051055) \wedge \text{param1}) * \text{param5}) * \\
& 0.44821579547708545) - (\text{param5} * (0.17628326714495768 + \text{param1})))) * \\
& 0.17332716237127277)))) * (\text{param4} + (\text{param2} - \text{param1})) * 0.17332716237127277) * \\
& \text{param2}) > (\text{param5} + \text{param5}))
\end{aligned}$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 100% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 35.



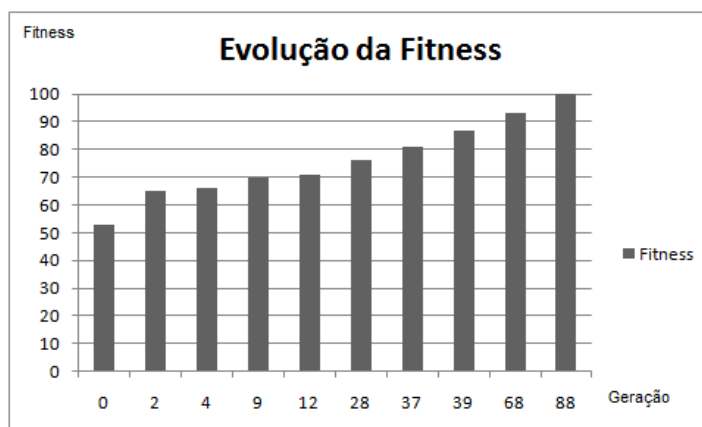


Figura 35: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3.

Utilizando base balanceada

A base balanceada consiste em igualar as quantidades de registros de cada classe com a finalidade de obter melhores regras. O algoritmo do framework MINERA obteve valor superior às demais ferramentas consideradas somente para a classe 1. Para as demais classes os valores de erro foram muito próximos. Estes valores podem ser observados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17: Resultados obtidos para RNA e AD utilizando base de dados balanceada (Castanheira, pág. 83)

| Classes | Rede Neural | | | | Árvore de Decisão | | | |
|----------|-----------------------|-----------|-------------|--------|--------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | | Erro (%) | | | |
| | Geração da Rede (IEC) | | Diagnóstico | | Montagem da árvore (IEC) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 2 | Base 3 | Treinamento | Validação | Base 2 | Base 3 |
| Classe 1 | 0,0 | 0,0 | 54,2 | 31,8 | 0,0 | 0,0 | 34,1 | 11,2 |
| Classe 2 | 13,3 | 42,8 | 36,1 | 47,4 | 6,6 | 42,8 | 13,9 | 39,3 |
| Classe 3 | 0,0 | 14,2 | 30,1 | 39,1 | 0,0 | 0,0 | 23 | 36,7 |

Tabela 18: Simulação 1 - Resultados do MINERA

| Classes | MINERA (Melhor Regra) | | | |
|----------|------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | |
| | Geração da Regra (IEC) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 2 | Base 3 |
| Classe 1 | 0,0 | 0,0 | 33,1 | 9,6 |
| Classe 2 | 0,0 | 0,0 | 39,5 | 31,2 |
| Classe 3 | 19,6 | 23,5 | 29,8 | 40,1 |

A melhor regra obtida para as classes 1, 2 e 3 é apresentada a seguir. Ao ser executada, esta cláusula SQL filtra os dados no banco de dados. Essa cláusula é apresentada da seguinte forma:



Regras encontradas

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 1:

WHERE

$$((0.0953628404557274 - \text{param3}) < (((\text{param2} * (((\text{param3} - \text{param2}) - \text{param3}) * \text{param4}) * (\text{param4} - (0.3158779792300447 - \text{param3}))) + 0.3158779792300447)) * 0.0953628404557274) * (((\text{param4} * 0.3158779792300447) + (((0.0953628404557274 - ((0.0953628404557274 * (0.0953628404557274 + \text{param3}))) * \text{param3}) * (0.17404252455799296 - \text{param3})) - 0.0953628404557274)) - \text{param3}))) - 0.0953628404557274))) * (\text{param3} + 0.3158779792300447)) - \text{param3}) * 0.0953628404557274) * 0.0953628404557274))$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 100 % dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 36. Podemos perceber que a melhor regra foi obtida na geração de número 72, ou seja, com 72 iterações a melhor regra foi descoberta.

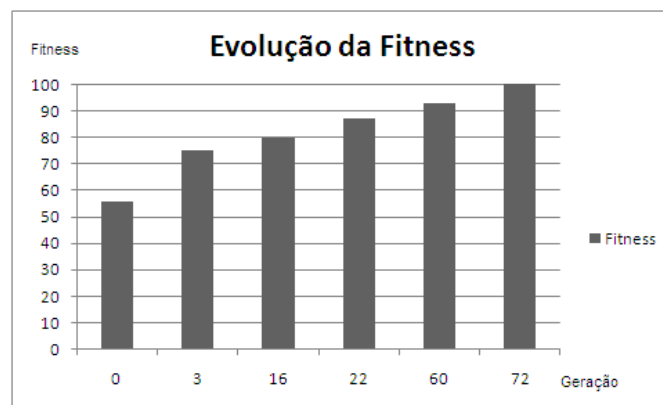


Figura 36: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 2:

WHERE

$$((0.935148780485996 * (0.7905877126370588 * \text{param5})) > \text{param3})$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 100 % dos dados. Esta regra foi encontrada na 1ª iteração.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 3:

WHERE

$$0.44821579547708545) - (\text{param5} * (0.17628326714495768 + \text{param1})))) * 0.17332716237127277)) * (\text{param4} + (\text{param2} - \text{param1})) * 0.17332716237127277) * \text{param2}) > (\text{param5} + \text{param5}))$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 100% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 37.



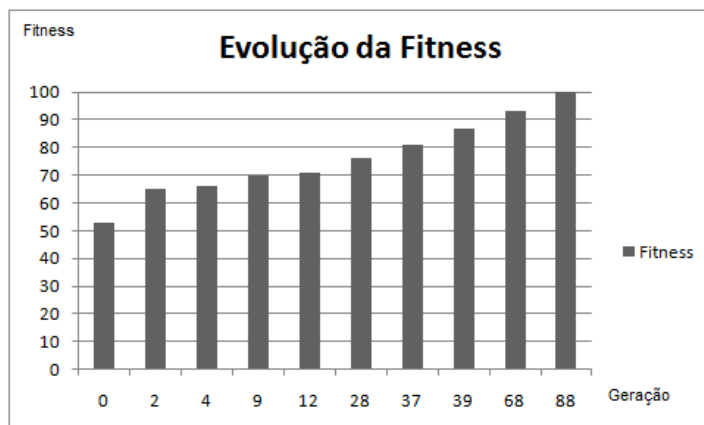


Figura 37: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3.

Análise 2

Utilizando base desbalanceada

O algoritmo do framework MINERA obteve resultados melhores que os obtidos pela Rede Neural mas inferiores aos obtidos utilizando Árvore de Decisão. Os valores podem ser observados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19: Resultados obtidos para RNA e AD utilizando base de dados balanceada (Castanheira, pág. 83)

| Classes | Rede Neural | | | | Árvore de Decisão | | | |
|----------|--------------------------|-----------|-------------|--------|-----------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | | Erro (%) | | | |
| | Geração da Rede (Base 2) | | Diagnóstico | | Montagem da árvore (Base 2) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 |
| Classe 1 | 6,1 | 45,9 | 36,9 | 36,4 | 5,2 | 32,0 | 25,0 | 31,8 |
| Classe 2 | 8,1 | 39,7 | 17,2 | 21,3 | 6,9 | 27,7 | 9,1 | 15,4 |
| Classe 3 | 12,2 | 23,9 | 78,7 | 87,9 | 10,5 | 16,7 | 50,0 | 74,1 |

Tabela 20: Simulação 1 - Resultados do MINERA

| Classes | MINERA (Melhor Regra) | | | |
|----------|---------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | |
| | Geração da Regra (Base 2) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 |
| Classe 1 | 2,2 | 4,5 | 22,3 | 30,6 |
| Classe 2 | 6,1 | 25,4 | 8,1 | 16,3 |
| Classe 3 | 15,6 | 26,3 | 75,2 | 78,9 |



A melhor regra obtida para as classes 1, 2 e 3 é apresentada sob a forma de uma cláusula SQL que filtra os dados no banco de dados. Essa cláusula é apresentada da seguinte forma:

Regras encontradas

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 1:

WHERE

```
(param3>=(((((((0.1589441125203711 ^ ((param4 - param5) ^ (param4 ^ 0.18463158264991142))) *
(param5 ^ param5) ^ ((((((param4 ^ ((param4 - ((((((param5 - param5) ^ (param4 * param5)) ^
0.40067161110965144) ^ (param5 - (((param4 * 0.17605455532472714) * ((param2 ^ param5) +
param5) * 0.1589441125203711))) * (param1 * (param4 * (((param1 * ((param4 -
(0.18463158264991142 * (param1 * ((param5 - (((((((param3 ^ param5) ^ (param2 - (param1 +
param5))) - (param5 - (0.09141667317071811 - (param1 + param2)))) ^ (param4 * ((param5 + param5) *
param5))) - param5) ^ (((((((param5 - 0.5127759880790751) ^ ((param3 ^ 0.5127759880790751) *
(param5 * param1))) - ((0.5127759880790751 * param5) * (((0.18463158264991142 ^
0.18463158264991142) ^ param5) ^ (param2 - (param1 + param5)))))) + param1) * param5) ^ (((param3
^ param5) ^ (param4 * param5) ^ 0.18463158264991142)) * param5) ^ (param2 - (param1 + param5)))
- (param3 - param3))) * (param2 ^ (param2 ^ (((0.16103669772306672 - param5) ^ param2) ^
(((((((0.1589441125203711 ^ (((param2 ^ 0.18463158264991142) ^ ((((((0.7818182087512652 ^
(((0.18463158264991142 - param5) ^ (param4 * param5)) * (param4 * (param3 * param4)))) ^ ((param4
^ (0.5127759880790751 ^ 0.049864532425278774)) ^ param5) ^ (param3 * ((0.42759968935351245 -
param5) ^ (param4 ^ (param3 - param5)))))) - 0.18463158264991142) - param5) -
(((0.1589441125203711 * (((0.5127759880790751 ^ (param1 ^ (param1 * 0.2732138060486331))) *
((0.07571331426400707 * (param5 * param1)) ^ ((param3 ^ 0.5127759880790751) -
((0.7818182087512652 ^ (((param1 - 0.1589441125203711) ^ param5) * param5)) ^
(((0.18463158264991142 + ((0.18463158264991142 * 0.16186166712138772) ^
0.7818182087512652)) * param5) * ((param5 + param2) - (((param5 - param5) ^ (param3 * param2)) ^
param3))) - param3)))) ^ param3) ^ (param5 * (((param1 ^ param5) ^ param1) ^ ((param4 - param5) ^
param4)))) * param4) * ((param4 * (((param4 ^ 0.12080875079954267) + (param4 * param5)) *
param5) + param4)))) - 0.16103669772306672) ^ 0.13425596261271944) ^ (param2 - (param1 +
param5)) - (param3 - param3) ^ (((param1 * (((((((param5 ^ ((param1 - 0.18463158264991142) ^
param3) + (param3 ^ 0.1101676417151557)) ^ param5) - 0.5127759880790751) ^ ((param2 *
((((param3 ^ 0.05498830601973059) - (param1 * 0.13965872293483017)) ^ (((param1 - param5) ^
(param4 ^ 0.18463158264991142) ^ param1)) - 0.18463158264991142) ^ (0.4654381686565767 ^
(param4 - (param1 - ((param5 ^ param5) * param4)))))) ^ ((0.6673562619652954 ^
0.09215792020524938) - param1))) - (param5 * param2)) + param5) * param5) ^ (param2 ^
(0.18463158264991142 * (0.353818977110711 ^ ((0.5127759880790751 - ((0.18463158264991142 -
((param2 - param5) ^ ((0.16103669772306672 - param5) ^ param2))) * ((param1 *
(0.5880494661808424 - (((0.7818182087512652 ^ (((param2 ^ param5) ^ (0.16103669772306672 -
param5)) - param5) ^ param1) * param5)) ^ (param4 ^ (param3 ^ 0.14800818213086808))) ^
(0.8105998302103978 ^ 0.8857925081772468)) ^ param5))) * (((param4 - param5) ^
(((0.5127759880790751 - (((param1 - (0.18463158264991142 * 0.1589441125203711) + param5) ^
((param3 ^ param3) + ((param4 * param1) * param5))) ^ (0.07571331426400707 * ((param5 - param5) ^
((0.572796341401108 - ((0.18463158264991142 - ((param5 + (param5 ^ param5)) * param4)) *
((param1 * (0.17605455532472714 - param4)) * ((param5 * param5) - ((0.9819373608549301 *
((((0.1589441125203711 ^ ((param4 - param5) ^ (param4 ^ 0.18463158264991142))) * (param1 ^
0.7818182087512652)) ^ ((param5 ^ 0.38362338011258146) ^ ((((((0.930146269621031 ^
((0.7818182087512652 + param3) * 0.1589441125203711)) ^ ((param1 - param5) - param1)) ^
(0.18463158264991142 * (param1 * 0.13965872293483017))) ^ 0.930146269621031) ^ (param5 *
(0.7892555035604407 ^ ((param5 ^ 0.36990107400797245) * 0.18463158264991142)))) *
0.18463158264991142))) + param3) * param5) ^ 0.7892555035604407)))) ^ (param4 - param5)))) ^
(((param5 - param5) ^ 0.38362338011258146) ^ 0.18463158264991142) + 0.18463158264991142) *
(((param5 ^ 0.18463158264991142) * param5) + (param5 ^ (((0.16103669772306672 - param5) ^
```



$$\begin{aligned}
& \text{param2}) * ((0.5127759880790751 - (((0.18463158264991142 - (\text{param5} * (\text{param4} * ((\text{param3} * \\
& 0.2821866844534564) * \text{param1})))) + (\text{param5} * 0.4654381686565767)) * ((\text{param1} * (\text{param5} - \\
& (\text{param4} * \text{param4})) * (\text{param5} - \text{param5})))) * \text{param5})) + (0.5127759880790751 + \text{param5})) * ((\text{param4} \\
& * \text{param5} - ((0.07571331426400707 \wedge \text{param5}) * (\text{param5} - \text{param5})))) \wedge 0.18463158264991142)) * \\
& \text{param5} * \text{param5} - 0.18463158264991142)) \wedge (0.18463158264991142 \wedge (0.40067161110965144 * \\
& \text{param5})))) \wedge 0.711176532833132) * (\text{param3} \wedge ((\text{param2} - \text{param5}) \wedge (\text{param4} * \text{param1})))) - \text{param5} \\
& \wedge ((((((((((0.1589441125203711 \wedge \text{param1}) \wedge (((0.1589441125203711 \wedge \text{param5}) \wedge ((\text{param4} \wedge \text{param5}) * \\
& (0.4654381686565767 \wedge 0.18463158264991142))) \wedge (((0.353818977110711 \wedge ((0.5127759880790751 - \\
& (\text{param4} * ((\text{param1} \wedge 0.7818182087512652) * (\text{param5} - \text{param5})) * (((0.65319688638608 \wedge \text{param5}) \\
& * \text{param5}) * \text{param5}) - (((\text{param4} * \text{param5}) \wedge (((\text{param5} \wedge (((0.4654381686565767 - \\
& 0.18463158264991142) - \text{param2}) * ((\text{param5} * (((0.1589441125203711 + \text{param5}) * \\
& (0.32528640394049324 - 0.1589441125203711)) * ((\text{param1} - (((\text{param5} \wedge (\text{param5} - \\
& ((0.930146269621031 \wedge \text{param2}) + \text{param5}))) - \text{param3}) \wedge (((\text{param1} * \text{param4}) - \\
& 0.18463158264991142) - \text{param4}) * (0.8488560159074592 * 0.07571331426400707))) \wedge ((\text{param5} + \\
& \text{param1} - \text{param4})) * ((\text{param5} * \text{param5}) \wedge \text{param5})) * \text{param5})) - \text{param4})) \wedge (((\text{param5} * \\
& 0.5127759880790751) \wedge ((\text{param5} \wedge (\text{param4} * \text{param5})) * ((\text{param1} + ((\text{param5} \wedge \text{param5}) \wedge \\
& 0.18463158264991142)) - \text{param5})) \wedge (((\text{param1} - 0.15227663432381655) * ((0.930146269621031 \wedge \\
& (\text{param5} * \text{param4})) \wedge (((\text{param5} \wedge ((\text{param1} - 0.18463158264991142) - \text{param5})) - (\text{param3} \wedge \text{param3})) \\
& \wedge \text{param3}) - \text{param4})) - ((\text{param4} \wedge 0.603474106934124) \wedge \text{param3})) + \text{param2}) - \\
& 0.18463158264991142)) * 0.5127759880790751) - \text{param4}) * ((0.5127759880790751 \wedge \text{param5}) \wedge \\
& (((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge (((0.14800818213086808 \wedge (\text{param1} * ((\text{param4} + (\text{param4} - \\
& (0.930146269621031 \wedge ((0.38362338011258146 \wedge (0.4654381686565767 - (\text{param1} + (\text{param5} * \\
& ((((((((((0.1589441125203711 \wedge ((\text{param4} - \text{param5}) \wedge (\text{param4} \wedge 0.18463158264991142))) * (\text{param1} \wedge \\
& 0.7818182087512652)) \wedge (((\text{param4} * ((\text{param4} \wedge (\text{param1} - 0.1947064644970653)) - \\
& (0.1589441125203711 \wedge (((((0.8488560159074592 * 0.07571331426400707) * (((0.9060414968625886 \\
& \wedge \text{param4}) \wedge \text{param1}) \wedge ((\text{param4} - \text{param5}) \wedge \text{param4}))) \wedge \text{param3}) - (((\text{param1} \wedge 0.14800818213086808) \\
& \wedge 0.18463158264991142) * 0.1589441125203711)) + \text{param4}) * \text{param5})))) + \text{param4}) * ((((((((((\text{param5} * \\
& (\text{param2} \wedge ((\text{param1} \wedge (((\text{param1} \wedge \text{param5}) - \text{param3}) - \text{param1})) \wedge ((((((((((((\text{param5} + \text{param2}) * \\
& (\text{param4} * (\text{param1} * 0.4381799745929027))) \wedge 0.18463158264991142) \wedge \text{param5}) \wedge (\text{param5} - \\
& (0.1589441125203711 + \text{param5}))) - 0.16103669772306672) - (\text{param3} - (\text{param4} * \\
& 0.18463158264991142))) \wedge (\text{param3} * \text{param5})) \wedge (\text{param5} - (((((0.4654381686565767 \wedge \\
& 0.18463158264991142) \wedge ((\text{param1} + \text{param5}) * (((\text{param1} \wedge 0.16103669772306672) * \\
& (0.1589441125203711 * (\text{param2} \wedge ((\text{param2} \wedge (((0.18463158264991142 - \text{param5}) * (\text{param1} \wedge \\
& ((\text{param5} * \text{param5}) \wedge ((\text{param5} - 0.18463158264991142) - (((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge \\
& (\text{param5} * \text{param3})) - \text{param1})))) * \text{param4}) * (\text{param5} - (\text{param1} + \text{param4})))) \wedge ((0.5127759880790751 \\
& * \text{param5}) \wedge ((0.5152464007825013 * \text{param4}) * 0.32528640394049324)))) * ((((((((((((\text{param5} - \\
& \text{param5}) \wedge (\text{param4} * \text{param5})) \wedge 0.18463158264991142) \wedge \text{param5}) \wedge 0.18463158264991142) - \\
& 0.16103669772306672) \wedge ((\text{param2} \wedge (((\text{param2} - 0.1589441125203711) * (((\text{param5} - \text{param5}) \wedge \\
& 0.38362338011258146) \wedge 0.18463158264991142)) * (\text{param5} - (\text{param5} * \text{param5})))) + \\
& 0.1589441125203711) - \text{param5}) \wedge ((\text{param3} * \text{param5}) * \text{param5})) + \text{param4}) * (\text{param5} \wedge \\
& 0.7818182087512652)))) \wedge (((0.5127759880790751 * \text{param3}) * (((\text{param5} \wedge (0.18463158264991142 * \\
& \text{param5}) - (((\text{param5} \wedge ((\text{param2} - (\text{param1} \wedge 0.14800818213086808)) * (0.13965872293483017 - \\
& (\text{param5} \wedge \text{param4})))) \wedge (((((0.5127759880790751 * \text{param3}) * ((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge \\
& (\text{param4} * \text{param1})) - 0.1589441125203711) \wedge (0.65319688638608 - \text{param5})) * (((\text{param3} \wedge \\
& (0.14800818213086808 * \text{param2})) \wedge (((((0.304462316313982 \wedge ((\text{param1} - 0.1589441125203711) * \\
& 0.5127759880790751) * (\text{param5} - (\text{param5} * \text{param5})))) + 0.1589441125203711) * ((\text{param3} - \text{param5}) \\
& \wedge (\text{param4} \wedge 0.18463158264991142))) * (((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge \text{param2}) * \\
& (0.1589441125203711 \wedge (0.353818977110711 \wedge ((0.5127759880790751 - ((0.18463158264991142 - \\
& ((0.65319688638608 - (\text{param1} - 0.07571331426400707)) \wedge (\text{param5} - ((0.18463158264991142 - \\
& \text{param5}) \wedge ((0.7818182087512652 \wedge \text{param1}) \wedge (\text{param5} * ((\text{param1} - 0.18463158264991142) \wedge (\text{param3} \\
& \wedge \text{param3})))))) * ((0.16103669772306672 - \text{param5}) * (((0.65319688638608 \wedge \text{param2}) * \text{param5}) * \\
& \text{param5}) - (((\text{param2} - 0.3460423998024629) - \text{param1}) * \text{param5}) \wedge (\text{param5} - \text{param5})))) \wedge \\
& (0.930146269621031 \wedge (\text{param2} * \text{param5})))) * (\text{param3} * (\text{param5} * \text{param1}))) \wedge \text{param4})) * \\
& \text{param5}) \wedge (\text{param1} * \text{param5})) - (\text{param2} \wedge (((0.16103669772306672 - \text{param5}) \wedge ((\text{param3} \wedge \text{param5}) - \\
& \text{param5})) \wedge (\text{param1} - \text{param5})))) \wedge (\text{param4} \wedge (\text{param4} \wedge 0.18463158264991142))) + \text{param5})) -
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& (\text{param5} * 0.18463158264991142)) \wedge \text{param2} - ((0.930146269621031 \wedge (\text{param4} * \text{param1})) \wedge \\
& (((\text{param1} * 0.13965872293483017) - (((0.1589441125203711 \wedge \text{param5}) * \text{param2}) \wedge \text{param3})) - \\
& 0.18463158264991142)))) - \text{param4} * (\text{param2} \wedge (((\text{param2} \wedge ((0.711176532833132 \wedge ((\text{param2} \wedge \\
& (((0.6250353144173543 - \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge (((\text{param4} - \text{param5}) \wedge (\text{param4} * \\
& (((0.5127759880790751 * (\text{param4} * (\text{param1} - ((0.12406673704265991 + \text{param5}) - \text{param5})))) + \\
& \text{param5}) * \text{param5})) - \text{param5}) \wedge (((\text{param5} \wedge (\text{param4} * \text{param3})) - \text{param4}) - \text{param4}) * (\text{param5} \wedge \\
& (\text{param3} \wedge (((0.5699868395979375 \wedge ((\text{param5} \wedge \text{param5}) - 0.18463158264991142)) \wedge \text{param3}) - \\
& \text{param5})))) + \text{param4} * (\text{param4} \wedge 0.7818182087512652))) - \text{param5})) \wedge 0.7818182087512652)) - \\
& 0.5127759880790751) \wedge ((\text{param4} - (\text{param1} \wedge \text{param5})) * (((\text{param5} - \text{param5}) * \\
& ((0.18463158264991142 - \text{param5}) * \text{param3})) * \text{param1}))) - ((0.07571331426400707 \wedge \text{param5}) * \\
& (((((((((\text{param4} \wedge (\text{param5} - (((\text{param3} \wedge ((0.18463158264991142 \wedge (((((((\text{param5} * \\
& 0.42759968935351245) \wedge (((((((((\text{param4} \wedge ((\text{param4} - (((\text{param1} \wedge (((((((0.13965872293483017 + \\
& (\text{param1} \wedge 0.14800818213086808) * (((((0.17605455532472714 * \text{param5}) \wedge ((0.5152464007825013 * \\
& \text{param4}) * 0.32528640394049324)) \wedge \text{param4}) * (\text{param1} * 0.13965872293483017)))) \wedge \\
& 0.18463158264991142) \wedge (((((0.1589441125203711 \wedge \text{param5}) * (\text{param1} \wedge 0.7818182087512652)) \wedge \\
& ((\text{param3} \wedge 0.18463158264991142) * \text{param5})) * \text{param5})) \wedge (\text{param5} - (((((((\text{param2} \wedge \text{param2}) \wedge \\
& 0.18463158264991142) \wedge 0.21510886300030374) \wedge \text{param2}) \wedge 0.14800818213086808) + \\
& (0.2416124628412627 \wedge (0.1589441125203711 - \text{param5})))) - \text{param5})) \wedge (\text{param5} - (((\text{param4} * \\
& 0.17605455532472714) * (0.1589441125203711 * (\text{param2} \wedge ((\text{param2} \wedge (0.1589441125203711 * \\
& (\text{param5} - \text{param3}))) \wedge (0.1589441125203711 - \text{param5})))) * 0.1589441125203711))) * (\text{param1} * \\
& (\text{param4} * (((0.4654381686565767 - \text{param4}) - (\text{param1} + \text{param5})) \wedge (((0.16103669772306672 - \\
& \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge 0.18463158264991142)))) * (\text{param5} * \text{param5})) - (((0.18463158264991142 \wedge \\
& 0.14800818213086808) \wedge 0.18463158264991142) * 0.1589441125203711)) + \text{param4}) * \text{param5}) \wedge \\
& \text{param5}) * (\text{param3} * (\text{param5} * \text{param3})) \wedge 0.18463158264991142) \wedge 0.21510886300030374) \wedge \\
& (((0.5127759880790751 * \text{param5}) * (0.5455340193267318 \wedge (\text{param4} * \text{param5}))) - \\
& ((0.18463158264991142 \wedge \text{param1}) + ((0.5127759880790751 * 0.14800818213086808) * \\
& 0.6328795515962725)))) \wedge \text{param5}) \wedge (\text{param5} - (0.18463158264991142 \wedge (\text{param5} \wedge \\
& (0.18463158264991142 * \text{param5})))) - 0.16103669772306672) \wedge ((0.5127759880790751 - \\
& ((0.5127759880790751 \wedge \text{param5}) * \text{param5})) \wedge \text{param5})) \wedge \text{param4} * (0.9667720447912589 - \\
& 0.7818182087512652)) \wedge 0.930146269621031)) \wedge ((\text{param3} \wedge \text{param2}) - (\text{param1} + \text{param5})) - \\
& 0.18463158264991142) \wedge 0.18463158264991142 - \text{param5})) - 0.18463158264991142) \wedge (((((((\text{param5} \\
& * (\text{param1} * \text{param3})) \wedge ((\text{param5} \wedge \text{param2}) \wedge 0.18463158264991142)) \wedge \text{param5}) \wedge \\
& (0.07571331426400707 - (0.1589441125203711 + (((((\text{param4} * 0.8387968207259874) + \text{param5}) + \\
& ((0.5513732677968471 - (0.049864532425278774 * \text{param5})) \wedge \text{param1})) * 0.17605455532472714) * \\
& (\text{param5} * (\text{param2} \wedge \text{param5})))))) - \text{param4}) \wedge (\text{param3} * (((0.18463158264991142 * \\
& (0.17605455532472714 \wedge (((((((0.930146269621031 - 0.18463158264991142) \wedge (((((((\text{param5} * \text{param5}) * \\
& (((((0.8488560159074592 * 0.07571331426400707) * ((0.9060414968625886 \wedge \text{param4}) \wedge \text{param1}) \wedge \\
& (((((\text{param1} - 0.1589441125203711) \wedge \text{param1}) * \text{param2}) - \text{param5}) \wedge \text{param4}))) \wedge (\text{param4} * \text{param5})) \wedge \\
& 0.18463158264991142)) * 0.1589441125203711) \wedge (((0.18463158264991142 \wedge 0.14800818213086808) \\
& * 0.17605455532472714) \wedge (\text{param3} - 0.7818182087512652))) - 0.15092070920795575)) - (\text{param2} \wedge \\
& \text{param1})) \wedge \text{param5}) * \text{param5}) \wedge (\text{param1} * \text{param5})) \wedge (((((\text{param2} \wedge \text{param1}) \wedge (\text{param5} - \\
& (((((0.820004811971808 \wedge 0.18019029049358215) - 0.16103669772306672) - \text{param5}) * (((\text{param1} + \\
& \text{param5}) * \text{param3}) * (((((0.18463158264991142 \wedge 0.09569566838947252) \wedge (\text{param2} \wedge ((\text{param2} \wedge \\
& (((0.18463158264991142 - \text{param5}) * (((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge ((\text{param5} \wedge \text{param3}) \wedge \\
& (((\text{param1} - 0.1589441125203711) - (((\text{param5} * 0.17605455532472714) * (\text{param5} * (\text{param5} * \\
& (((\text{param1} + (0.572796341401108 + (\text{param3} \wedge \text{param5})))) \wedge (\text{param2} \wedge (((0.16103669772306672 - \\
& \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge (((\text{param2} \wedge ((\text{param4} * ((0.5127759880790751 + \text{param5}) * \text{param5})) - \\
& 0.1589441125203711)) - \text{param5}) \wedge (\text{param4} * ((0.4942105764224437 * 0.6546305736654258) * \\
& \text{param5}))) - \text{param5})))) - \text{param4}) * (\text{param5} - (\text{param3} - \text{param1})))) * 0.1589441125203711)) + \\
& \text{param1})) \wedge \text{param5})) \wedge \text{param3})) * \text{param4}) * (\text{param3} - (\text{param1} + \text{param4})))) \wedge \\
& 0.21724892512782035)) \wedge ((\text{param1} - \text{param1}) \wedge (\text{param5} * (((0.18463158264991142 \wedge (((((\text{param1} \wedge \\
& \text{param4}) * (\text{param5} * 0.13965872293483017)) \wedge 0.10227257501819442) + \text{param4}) * \\
& (((0.1589441125203711 \wedge (\text{param3} \wedge (\text{param4} \wedge 0.17605455532472714))) * (\text{param1} \wedge \text{param3})) - \\
& \text{param5}) * ((0.18463158264991142 - (\text{param5} - \text{param5})) * (((0.9752089987053545 - \\
& 0.1589441125203711) \wedge (((0.16103669772306672 - \text{param5}) \wedge ((0.48021214580986527 *
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& 0.18463158264991142) * (\text{param5} - (\text{param1} + \text{param4}))) ^ (0.16103669772306672 - \text{param5}) ^ \\
& (\text{param5} * (0.18463158264991142 + ((((\text{param4} * (0.13965872293483017 ^ \text{param3})) * \text{param5} - \\
& 0.18463158264991142) - \text{param4} - 0.18463158264991142)))) ^ 0.7818182087512652)))) ^ \text{param5} - \\
& 0.7818182087512652)))) - \text{param5} ^ \text{param5}) - (((0.1589441125203711 - (0.18463158264991142 - \\
& \text{param4})) ^ (0.049864532425278774 * \text{param5})) ^ \text{param5} ^ (((\text{param2} ^ \text{param4} ^ \\
& 0.14800818213086808) * \text{param1}) - (\text{param2} - (\text{param1} + \text{param5})))))) * (((\text{param5} ^ \text{param5}) * (\text{param1} \\
& - \text{param2})) ^ \text{param5}) * (\text{param2} ^ 0.07571331426400707)))) ^ \text{param1} ^ (0.18463158264991142 ^ \\
& 0.18463158264991142) - 0.5127759880790751)))) - \text{param4} * (((\text{param5} ^ ((\text{param3} ^ (((\text{param1} - \\
& ((\text{param1} ^ \text{param3}) * (\text{param1} * 0.4381799745929027))) ^ \text{param5}) * 0.4654381686565767)) ^ (\text{param4} \\
& - \text{param5})) ^ \text{param4} - (\text{param5} ^ 0.18463158264991142)))) ^ ((\text{param5} + \text{param2}) - \\
& ((((((0.1589441125203711 ^ \text{param5}) * (\text{param1} ^ (\text{param4} - ((0.18463158264991142 - (\text{param5} * \\
& (\text{param4} * 0.13664079790439365))) + (\text{param1} * (0.5005546353030994 - 0.5979112903084085)))))) ^ \\
& \text{param4} + (\text{param5} - ((\text{param4} ^ ((0.21671864885351633 + (0.7818182087512652 ^ (\text{param4} ^ ((\text{param5} \\
& - \text{param5}) ^ ((\text{param5} ^ (0.65319688638608 - ((\text{param5} - \text{param5}) ^ (\text{param4} * \text{param5})))) * \\
& (0.18463158264991142 * (\text{param3} ^ (0.930146269621031 - (0.14800818213086808 + \text{param5})))))) * \\
& (((\text{param5} - \text{param5}) ^ (\text{param4} * \text{param5})) ^ 0.13965872293483017))) * \text{param5})) * \text{param5} * (\text{param5} \\
& * ((0.049864532425278774 * \text{param5}) ^ (((\text{param5} ^ ((\text{param4} * \text{param5}) - (0.1589441125203711 + \\
& \text{param5}))) - 0.16103669772306672) ^ ((((((\text{param5} ^ 0.14800818213086808) ^ (\text{param2} - (\text{param5} * \\
& (((0.1589441125203711 ^ \text{param5}) * (\text{param1} ^ ((0.18463158264991142 - 0.1589441125203711) ^ \\
& (\text{param1} ^ 0.14800818213086808)))) - \text{param5}) * 0.4654381686565767)))) - ((0.9667720447912589 - \\
& (((\text{param5} * (\text{param4} * 0.8387968207259874)) ^ (0.1589441125203711 - (((\text{param3} ^ \\
& (0.4654381686565767 - \text{param5})) * \text{param5}) * (0.4654381686565767 ^ ((\text{param1} * (\text{param5} - ((\text{param5} - \\
& 0.18463158264991142) * (0.18463158264991142 ^ (((\text{param1} + \text{param5}) * \text{param5}) ^ \text{param5}) ^ \\
& ((0.5513732677968471 - (((\text{param3} ^ \text{param5}) ^ ((\text{param4} ^ ((\text{param3} ^ \text{param2}) - \text{param5})) ^ \text{param2})) * \\
& \text{param4})) - (\text{param1} + \text{param5})))))) * \text{param5})))) ^ 0.9060414968625886) * ((\text{param4} * (\text{param5} - \\
& 0.1589441125203711)) * (((0.18463158264991142 ^ \text{param3}) ^ \text{param5}) * \text{param5}) * \text{param5} - \\
& (((((((0.1589441125203711 ^ \text{param5}) * (\text{param1} ^ (\text{param4} - \text{param5}))) ^ \text{param4} + \text{param3} - \\
& 0.18463158264991142) ^ \text{param2} - (((\text{param1} ^ (((\text{param1} - 0.14800818213086808) * \text{param5}) ^ \\
& \text{param5}) * (\text{param3} * (\text{param5} * \text{param3})))) + \text{param3}) * 0.40067161110965144) * (\text{param5} * \\
& (0.7818182087512652 * \text{param5})))) * \text{param5} ^ (\text{param5} - \text{param5})))) ^ ((\text{param1} - \\
& 0.18463158264991142) ^ \text{param3}) - \text{param5} ^ (((((((0.18463158264991142 * 0.07571331426400707) \\
& * (((0.9060414968625886 ^ \text{param4} ^ \text{param1}) ^ ((\text{param4} - \text{param5}) ^ (\text{param5} ^ (((\text{param4} ^ \\
& (((\text{param5} - (((\text{param4} ^ ((\text{param5} - \text{param5}) ^ ((\text{param5} ^ ((\text{param3} ^ \text{param3}) - \\
& 0.7818182087512652)) * \text{param4}))) - 0.18463158264991142) ^ ((\text{param4} - \text{param5}) * (\text{param1} * \\
& (\text{param2} ^ (((\text{param5} ^ (\text{param4} * ((0.14800818213086808 ^ (\text{param2} - (\text{param1} + \text{param5}))) - \\
& \text{param5}))) ^ 0.304462316313982) ^ (\text{param5} * (\text{param5} ^ (\text{param3} - \text{param3})))) ^ \text{param5} ^ \\
& ((0.14800818213086808 ^ (\text{param1} * ((\text{param4} + (\text{param4} - (0.930146269621031 ^ (((\text{param4} - \\
& 0.1589441125203711) ^ (((0.18463158264991142 ^ ((0.4654381686565767 - \text{param5}) * \\
& 0.5127759880790751)) ^ 0.18463158264991142) * 0.4654381686565767)) ^ (0.4654381686565767 - \\
& (\text{param1} + (\text{param5} * (((\text{param4} - \text{param5}) ^ (((\text{param1} * \text{param5}) * \text{param5}) ^ \\
& 0.18463158264991142)) ^ 0.1589441125203711) - \text{param4}) ^ 0.31109855123876384) ^ (\text{param3} - \\
& \text{param3})))) * \text{param5})))) * \text{param5})))) - (((\text{param4} * ((\text{param4} ^ (\text{param5} - 0.1947064644970653)) - \\
& (0.07571331426400707 ^ \text{param1}))) + \text{param4}) * (((((((\text{param5} * (\text{param2} ^ ((\text{param1} ^ ((\text{param1} ^ \\
& \text{param5}) - \text{param3}) - \text{param1})) ^ ((((((((\text{param5} ^ (\text{param5} - (((\text{param5} ^ ((\text{param4} ^ \text{param5}) ^ \\
& \text{param5}) ^ (((\text{param4} - \text{param5}) ^ (((0.5524341144457771 - (\text{param3} - \text{param2})) - (((\text{param1} ^ \\
& 0.9667720447912589) * 0.17605455532472714) * \text{param1})) ^ (\text{param5} * (\text{param2} ^ (\text{param1} ^ ((\text{param3} \\
& ^ ((\text{param1} - (((0.1589441125203711 ^ (0.881363499841627 ^ (\text{param4} ^ 0.18463158264991142)))) * \\
& (((\text{param1} - \text{param5}) ^ ((\text{param1} * ((\text{param1} ^ \text{param3}) * 0.65319688638608)) ^ \\
& 0.18463158264991142)) ^ \text{param1} ^ (\text{param1} * \text{param5}))) ^ \text{param3} + (\text{param3} ^ ((\text{param3} + \text{param3}) * \\
& \text{param2}))) * 0.17605455532472714)) ^ 0.18463158264991142) * 0.17605455532472714)) - \\
& (0.5127759880790751 * \text{param3})))))) + (\text{param5} - \text{param4})) ^ ((0.18463158264991142 + \\
& 0.24008754389129128) - \text{param5})) * \text{param5}))) ^ (\text{param5} - \text{param2}) - (0.18463158264991142 ^ \\
& (\text{param4} * (((((((\text{param2} ^ \text{param5}) - (\text{param3} - \text{param3})) ^ (\text{param4} * 0.7818182087512652)) ^ (\text{param4} - \\
& (\text{param1} + \text{param1}))) - (((\text{param5} ^ \text{param5}) ^ \text{param4} - 0.16103669772306672) ^ (\text{param4} ^ \\
& (0.18463158264991142 ^ 0.9060414968625886)))) ^ (\text{param4} * ((\text{param1} + \text{param1}) * \text{param5}))) *
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& \text{param5}))) + (\text{param1} + ((((((0.18463158264991142 - \text{param5}) ^ (((((\text{param5} * \text{param5}) - \text{param5}) ^ \\
& (((((0.18463158264991142 - \text{param5}) ^ 0.05498830601973059) ^ \text{param5}) ^ ((\text{param3} * \text{param3}) - \\
& \text{param5}))) ^ \text{param4}) ^ \text{param5})) ^ \text{param4}) ^ \text{param5}) ^ 0.5152464007825013) - \\
& 0.5576661153572461)))) + \text{param4} * (\text{param4} * (\text{param2} * 0.4381799745929027))) ^ \\
& 0.18463158264991142) ^ \text{param5}) ^ (\text{param5} - (0.18463158264991142 + \text{param5})) - \\
& 0.16103669772306672) - (\text{param3} - (\text{param4} * 0.18463158264991142))) ^ (\text{param3} * \text{param5})) ^ \\
& (0.7818182087512652 * ((0.4654381686565767 * 0.4654381686565767) * (0.9052054750901195 * \\
& \text{param1})))) - (\text{param1} * 0.1589441125203711) ^ \text{param2}) - ((0.930146269621031 ^ \text{param2}) ^ (((\text{param1} \\
& * 0.13965872293483017) - 0.18463158264991142) - 0.18463158264991142)))) - \text{param4} * (\text{param2} ^ \\
& (((((\text{param5} + \text{param2}) - (0.18463158264991142 - ((((((\text{param1} - \text{param4}) ^ 0.42759968935351245) ^ \\
& \text{param1}) ^ \text{param4}) - \text{param5}) ^ \text{param3}))) ^ \text{param5}) ^ ((\text{param4} - \text{param3}) - \text{param1}) ^ (\text{param5} - \\
& ((0.930146269621031 ^ (\text{param2} * \text{param1})) ^ (\text{param5} - 0.18463158264991142)))))) ^ \text{param5}) ^ \\
& (\text{param4} ^ 0.7818182087512652)) - 0.16103669772306672) ^ (((0.4654381686565767 - \\
& 0.18463158264991142) - 0.4654381686565767) * (((\text{param1} + \text{param5}) ^ (\text{param4} * \\
& 0.4654381686565767)) ^ (\text{param5} - 0.1589441125203711))) ^ ((\text{param5} + \text{param2}) - (\text{param4} * \\
& ((0.18463158264991142 ^ (\text{param1} - \text{param4}) ^ \text{param3})))) ^ \text{param5})))) - ((((((\text{param5} * (\text{param1} * \\
& \text{param3})) ^ ((0.18463158264991142 ^ \text{param2}) ^ 0.18463158264991142)) ^ \text{param5}) ^ \\
& (0.07571331426400707 - (0.1589441125203711 + (((((((((((((\text{param4} - \text{param5}) ^ ((((\text{param5} ^ \text{param3}) \\
& ^ ((((((0.16103669772306672 - \text{param5}) ^ (\text{param1} ^ \text{param3})) ^ (\text{param1} - \text{param5})) - \\
& 0.1589441125203711) - (\text{param2} ^ ((0.48021214580986527 * 0.18463158264991142) * (\text{param5} - \\
& (\text{param1} + \text{param4})))))) + \text{param1})) ^ (0.18463158264991142 ^ 0.18463158264991142)) ^ \\
& (0.37524180574362864 ^ (\text{param5} - \text{param4})))) ^ 0.18463158264991142) ^ \text{param5}) ^ (\text{param2} - \\
& (\text{param1} + \text{param5})) - (\text{param3} - \text{param3})) ^ (\text{param4} * ((\text{param5} + \text{param5}) * \text{param5})) - \text{param1}) ^ \\
& (0.1589441125203711 * \text{param5})) * 0.8387968207259874) + \text{param5}) + (\text{param5} ^ \text{param1})) * \\
& 0.17605455532472714) * (\text{param5} * (\text{param2} ^ \text{param5})))) - \text{param4} ^ (\text{param3} * \\
& (((0.18463158264991142 * (0.17605455532472714 ^ (((((((0.5524341144457771 - (\text{param2} ^ \text{param1})) ^ \\
& \text{param5}) * \text{param5}) ^ (\text{param2} * \text{param5})) ^ (((((\text{param2} ^ \text{param1}) ^ (\text{param5} - ((((((\text{param3} * \\
& 0.4654381686565767) ^ (\text{param1} - ((\text{param5} ^ ((((\text{param3} ^ (\text{param4} * \text{param5})) ^ \\
& 0.18463158264991142) ^ \text{param5}) ^ (\text{param2} - (\text{param1} + \text{param5})))) * (((\text{param5} - \text{param5}) ^ (\text{param4} * \\
& \text{param5})) * (\text{param5} * \text{param5})))) * 0.049864532425278774) ^ ((\text{param5} ^ ((\text{param4} - \text{param5}) ^ \\
& ((\text{param3} + 0.31109855123876384) * 0.14800818213086808))) * 0.18040670664204606) + \text{param3}) * \\
& (((\text{param1} + \text{param5}) * \text{param3}) * (((((0.18463158264991142 ^ 0.09569566838947252) ^ (\text{param2} ^ \\
& ((\text{param2} ^ (((0.18463158264991142 - \text{param5}) * (\text{param1} ^ \text{param3})) * \text{param4}) * (\text{param3} - (\text{param1} + \\
& \text{param4})))) ^ (0.18463158264991142 - \text{param5})))) ^ ((\text{param1} - \text{param1}) ^ (\text{param5} * \\
& (((0.18463158264991142 ^ (((((\text{param1} ^ \text{param4}) * (\text{param5} * 0.13965872293483017)) ^ \\
& 0.10227257501819442) + \text{param4}) * (((0.1589441125203711 ^ (\text{param3} ^ (\text{param4} ^ \\
& 0.17605455532472714))) * (\text{param1} ^ \text{param3})) - 0.1589441125203711) * ((((\text{param2} ^ (\text{param3} * \\
& ((\text{param5} + (0.16103669772306672 * (0.9884957085866477 + \text{param3}))) * \text{param5}))) - \\
& (((0.8488560159074592 ^ (\text{param2} ^ (((\text{param4} ^ 0.603474106934124) * ((((\text{param4} - \text{param5}) * \\
& \text{param3}) * (\text{param2} ^ \text{param5})) * \text{param4})) * 0.1589441125203711))) * (((0.049864532425278774 * \\
& \text{param5}) ^ (\text{param4} ^ (((((((((\text{param5} - \text{param5}) ^ \text{param4}) ^ 0.18463158264991142) ^ \\
& 0.14800818213086808) ^ (\text{param2} - (((\text{param2} ^ ((((\text{param1} * 0.13965872293483017) - \\
& 0.18463158264991142) - 0.4654381686565767) * (0.14800818213086808 * \text{param2}))) ^ (\text{param1} - \\
& 0.1947064644970653)) ^ ((\text{param1} ^ (\text{param5} - (\text{param5} * 0.17605455532472714))) - \\
& 0.16103669772306672)))) - 0.16103669772306672) ^ (\text{param4} * ((\text{param1} + \text{param5}) * \text{param5})) - \\
& \text{param1}) ^ ((((((\text{param4} * (((0.9060414968625886 ^ \text{param4}) ^ \text{param1}) ^ ((\text{param4} - \text{param5}) ^ \\
& \text{param4}))) ^ \text{param3}) - (((\text{param1} ^ 0.14800818213086808) ^ 0.18463158264991142) * \\
& 0.1589441125203711) + \text{param4}) * \text{param5}) ^ ((\text{param5} * \text{param5}) ^ (0.930146269621031 ^ \\
& ((0.14800818213086808 ^ (\text{param5} - (\text{param1} + (\text{param5} - \text{param4})))) * \text{param5}))) * \text{param5})) + \text{param4}) \\
& * (\text{param1} ^ \text{param5})))) - \text{param4})) * \text{param2})) ^ (\text{param4} * \text{param1})) + \text{param4} * (((\text{param1} * \text{param4}) - \\
& 0.18463158264991142) - \text{param4}) ^ 0.7818182087512652)))) ^ \text{param5}) - 0.7818182087512652)))) - \\
& \text{param5}) ^ \text{param5}) - (((0.1589441125203711 - (0.18463158264991142 - \text{param4})) ^ ((((\text{param1} ^ \\
& (0.5127759880790751 - \text{param5})) - 0.18463158264991142) ^ 0.14800818213086808) * \text{param1}) ^ \\
& 0.32528640394049324)) ^ 0.14800818213086808) ^ ((\text{param4} * \text{param1}) - \text{param4})))) * ((((\text{param5} ^ \\
& \text{param5}) * (\text{param1} - \text{param2})) ^ \text{param5}) * \text{param5})))) ^ \text{param1}) ^ (0.18463158264991142 ^
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& (0.18463158264991142)) - 0.5127759880790751)))) - \text{param4}) * (((\text{param5} \wedge ((\text{param3} \wedge \\
& ((0.16103669772306672 \wedge \text{param5}) * 0.4654381686565767)) \wedge 0.930146269621031)) \wedge \text{param4}) - \\
& (\text{param5} \wedge 0.18463158264991142)))))) * \text{param5}) \wedge \text{param4})) * \text{param5}) * \text{param5}) \wedge ((((\text{param2} \wedge \\
& \text{param1}) \wedge 0.1589441125203711) - \text{param4}) \wedge 0.31109855123876384)) \wedge 0.930146269621031)) \wedge \\
& (\text{param2} - 0.18463158264991142)) - 0.16103669772306672) \wedge (\text{param1} \wedge 0.7818182087512652)))))) \wedge \\
& \text{param3}) - ((0.14800818213086808 \wedge (\text{param5} - (\text{param1} + (\text{param5} - \text{param4})))) * \text{param5})) + \text{param4}) * \\
& \text{param5}) \wedge ((0.5127759880790751 - ((0.18463158264991142 - (\text{param1} \wedge \text{param5})) * \\
& (0.18463158264991142 * (((\text{param4} * (\text{param4} - \text{param5})) * \text{param5}) - \text{param5})))) \wedge (\text{param5} \wedge \\
& ((0.14800818213086808 \wedge \text{param4}) * (0.18463158264991142 - \text{param5})))) * \text{param5})) + \\
& (((((0.7818182087512652 * \text{param5}) \wedge (0.8669040888439483 * (\text{param4} * \text{param5}))) - \text{param5}) \wedge \\
& (((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge 0.18463158264991142)) \wedge \text{param1})) * (\text{param1} \wedge \\
& \text{param5})))))) * 0.3306825895940396) - \text{param1}) * \text{param5}) \wedge (\text{param5} - \text{param5})) * \text{param5}) * \text{param5}) \\
& \wedge \text{param4})))) \wedge \text{param5}) \wedge ((\text{param1} \wedge \text{param3}) * (\text{param1} * 0.4381799745929027))) - \\
& 0.16103669772306672) \wedge (((0.4654381686565767 - 0.18463158264991142) - 0.4654381686565767) * \\
& (((\text{param4} \wedge 0.18463158264991142) \wedge (\text{param5} - (((\text{param4} * 0.17605455532472714) * \\
& (0.1589441125203711 * (\text{param2} \wedge ((\text{param2} \wedge (((0.18463158264991142 - \text{param5}) * (\text{param1} \wedge \\
& \text{param3})) * \text{param4}) * (((((0.6546305736654258 \wedge ((\text{param2} \wedge \text{param3}) * (\text{param5} * \text{param1}))) - \\
& ((0.5127759880790751 * \text{param5}) * \text{param5})) + \text{param4}) * \text{param5}) - (0.18463158264991142 + \\
& \text{param4})))) \wedge (0.16103669772306672 - \text{param5})))) * 0.1589441125203711)) \wedge ((((\text{param1} - \\
& 0.1589441125203711) \wedge (\text{param3} + \text{param5})) * ((0.5127759880790751 + \text{param5}) * \text{param5})) - \\
& (((((((((0.5513732677968471 - (0.049864532425278774 * \text{param4})) \wedge (((\text{param5} \wedge ((\text{param5} + (\text{param5} \wedge \\
& 0.14800818213086808)) * ((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge (\text{param1} \wedge (\text{param1} * \text{param4})))))) \wedge \\
& \text{param5}) \wedge (0.18463158264991142 + \text{param5})) \wedge (\text{param2} \wedge \text{param5}))) - \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge \\
& 0.18463158264991142) \wedge \text{param1}) \wedge (((0.5127759880790751 * \text{param3}) * ((0.16103669772306672 - \\
& (\text{param2} - \text{param1})) - \text{param5})) - (((((((0.18463158264991142 \wedge (\text{param4} \wedge 0.7818182087512652)) \wedge \\
& \text{param2}) \wedge (0.18463158264991142 - \text{param5})) \wedge 0.21510886300030374) + ((0.5513732677968471 - \\
& (0.049864532425278774 * \text{param5})) \wedge 0.8387968207259874)) * 0.17605455532472714) \wedge \text{param1}) + \\
& 0.32528640394049324))) - 0.16103669772306672) + \text{param5}))) * 0.07571331426400707))) \wedge ((\text{param5} + \\
& \text{param2}) - (\text{param4} * ((0.4824837705747522 \wedge (\text{param1} - \text{param4})) \wedge \text{param3})))) \wedge \text{param5}) * (\text{param3} * \\
& (\text{param5} * \text{param3}))) + \text{param3}) \wedge \text{param1}) \wedge 0.1589441125203711) - \text{param4}) \wedge 0.31109855123876384) \\
& \wedge (\text{param3} - \text{param3})))) * \text{param5})))) * \text{param5}))) - ((((\text{param4} \wedge ((\text{param4} - (0.18463158264991142 * \\
& (\text{param1} * (((\text{param1} * ((0.049864532425278774 * ((\text{param5} * 0.18463158264991142) * \text{param1})) - \\
& 0.42064693967295896) * ((\text{param5} * \text{param5}) - \text{param5})) * (\text{param2} \wedge (\text{param2} - (\text{param1} + \\
& \text{param5})))))) * \text{param5}))) - (((0.18463158264991142 \wedge 0.14800818213086808) \wedge 0.18463158264991142) \\
& * 0.1589441125203711)) + \text{param4}) * \text{param5}) \wedge \text{param5}))) + ((\text{param4} \wedge 0.16100589446340452) * \\
& \text{param2}))) * ((\text{param2} \wedge ((0.7090557589633105 * \text{param2}) * 0.6076562099987477)) - \\
& 0.16103669772306672)))) \wedge (\text{param5} - \text{param5})))))) \wedge (0.930146269621031 \wedge (\text{param2} * \text{param5})))) \wedge \\
& (((((0.18463158264991142 - 0.18463158264991142) \wedge (\text{param5} * 0.32528640394049324)) \wedge (\text{param1} \wedge \\
& 0.9060414968625886)) \wedge \text{param4}) \wedge (((\text{param1} - ((\text{param4} * \text{param1}) - \text{param5})) \wedge 0.1589441125203711) \\
& \wedge (\text{param5} - \text{param4})))) \wedge 0.18463158264991142))) - 0.5127759880790751) \wedge ((((\text{param5} \wedge \\
& (((0.6764148565839775 \wedge 0.6707437311818387) \wedge 0.1589441125203711) - \text{param5})) * \\
& (0.18463158264991142 * 0.9060414968625886)) - ((((\text{param1} - \text{param5}) * \text{param1}) * (\text{param2} \wedge \\
& \text{param5})) * \text{param4}) * (\text{param1} * \text{param1})) * (\text{param5} * \text{param1})) - ((\text{param4} \wedge 0.18463158264991142) \\
& * \text{param4})) + \text{param4}) * 0.6663622044162155) \wedge (\text{param5} - \text{param4})) * (\text{param5} + \text{param5}))) + \\
& 0.18463158264991142) * (\text{param1} \wedge 0.7818182087512652)))))) \wedge (\text{param5} - \text{param5}))) - \text{param4}) - \\
& (\text{param1} + \text{param5}) \wedge (((0.16103669772306672 - \text{param5}) \wedge \text{param2}) \wedge ((((((((\text{param5} - \text{param5}) \wedge \\
& (\text{param4} * \text{param5}) \wedge 0.18463158264991142) \wedge (\text{param5} - (((\text{param4} * 0.17605455532472714) * \\
& (0.1589441125203711 * (\text{param2} \wedge ((0.930146269621031 \wedge (0.18463158264991142 \wedge \\
& 0.9060414968625886)) \wedge ((\text{param1} - 0.18463158264991142) - \text{param5})))) * 0.1589441125203711))) \wedge \\
& ((\text{param4} * ((0.5127759880790751 + \text{param5}) * \text{param5})) - (((((((0.18463158264991142 - \text{param5}) \wedge \\
& \text{param2}) \wedge (0.18463158264991142 - \text{param5})) \wedge 0.21510886300030374) \wedge (((0.18463158264991142 - \\
& \text{param5}) * \text{param3}) * ((0.18463158264991142 - 0.18463158264991142) \wedge (\text{param4} * \text{param5})))) - \\
& ((0.18463158264991142 \wedge (0.47644106729385916 \wedge ((((\text{param5} - \text{param5}) \wedge ((\text{param5} - \text{param5}) * \\
& 0.32528640394049324)) \wedge \text{param5}) * \text{param5}))) + 0.32528640394049324))) - 0.16103669772306672) + \\
& \text{param5}))) - \text{param1}) \wedge (((0.16103669772306672 - \text{param5}) \wedge \text{param2}) * ((0.16103669772306672 +
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \text{param5} * \text{param5})) - \text{param5})\text{)))))) * (\text{param5} * \text{param5})) - (((0.18463158264991142 \wedge \\ & 0.14800818213086808) \wedge 0.18463158264991142) * 0.1589441125203711) + \text{param4} * \text{param5} \wedge \\ & \text{param5} * (\text{param3} * (\text{param5} * \text{param3}))) + \text{param3} * \text{param1} * (\text{param5} * (\text{param2} \wedge \\ & (0.18463158264991142 \wedge (((((((((\text{param5} - \text{param5}) \wedge (\text{param4} * \text{param5})) \wedge 0.06805746003350688) \wedge \\ & \text{param5} \wedge (\text{param2} - (\text{param1} + \text{param5}))) - (\text{param4} - \text{param3})) \wedge (\text{param4} * (((((0.930146269621031 \wedge \\ & ((0.7818182087512652 + \text{param3}) * 0.1589441125203711) \wedge ((\text{param1} - \text{param5}) - \text{param1})) \wedge \\ & (0.18463158264991142 * (\text{param1} * 0.13965872293483017))) \wedge 0.930146269621031) \wedge ((\text{param4} \wedge \\ & \text{param4} * (0.7892555035604407 \wedge ((\text{param5} \wedge 0.36990107400797245) * 0.18463158264991142)))))) - \\ & \text{param3} \wedge (((\text{param5} + \text{param4}) * \text{param5}) \wedge \text{param5}) * \text{param5})) + \text{param4} * (\text{param4} \wedge \\ & 0.7818182087512652)))))) \end{aligned}$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 97,8% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 38. Podemos perceber que a melhor regra foi obtida na geração de número 79.

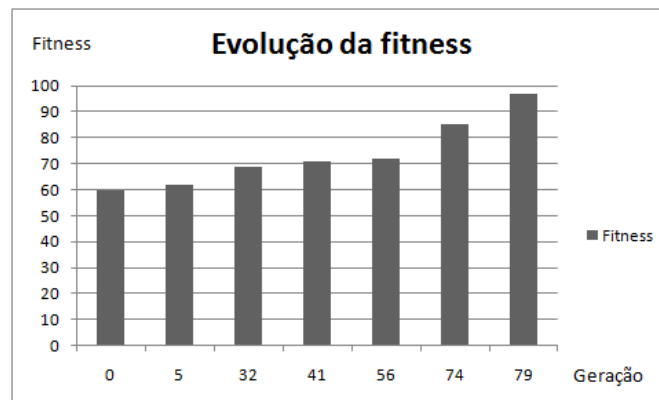


Figura 38: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 2:

WHERE

$$\begin{aligned} & (((0.12753189129222975 \wedge (0.43565811457383774 * (((((\text{param5} - (0.03362513348684226 * \\ & (((\text{param1} * (((\text{param5} * ((\text{param5} - (((\text{param5} - 0.9426172032116371) * (0.2948398414613985 * \\ & (\text{param1} * (((\text{param4} + 0.6781387355402035) + \text{param5}) + ((0.12753189129222975 * \\ & ((0.5694425228055466 + \text{param5}) - (\text{param5} * \text{param2}))) - (0.0480842470097228 * \\ & 0.5888996523616021)))))) * (\text{param5} - (0.3624086499434278 - \text{param1}))) * ((((\text{param5} \wedge \\ & 0.17028814960011385) + \text{param4}) \wedge ((0.12753189129222975 * \text{param5}) * (\text{param1} \wedge \text{param5}))) - \\ & \text{param5}) * ((\text{param5} \wedge (0.12753189129222975 + (((((((((0.12753189129222975 \wedge \text{param5}) * (\text{param5} \wedge \\ & 0.12753189129222975)) * \text{param4}) \wedge \text{param4}) + (0.9973521293037227 - 0.12753189129222975)) * \\ & \text{param4} * 0.541570738372512) + 0.43736857172506105))) + 0.5001686119116552)))) \wedge (\text{param5} + \\ & \text{param5}))) \wedge (((((0.12753189129222975 * \text{param2}) * ((((\text{param5} * ((\text{param5} \wedge ((0.052192293097272136 + \\ & (((((((((0.12753189129222975 \wedge \text{param5}) \wedge 0.12753189129222975) * (\text{param5} \wedge (((\text{param5} - \\ & ((0.47927726633903356 * \text{param5}) - \text{param5}) + (\text{param2} * \text{param3}))) + (((0.17678031409899764 - \\ & 0.2964602324053818) - ((0.5001686119116552 \wedge (\text{param5} - (\text{param5} \wedge \text{param2}))) * \text{param5})) + (\text{param5} \\ & \wedge (\text{param1} + ((\text{param5} \wedge 0.703259885718704) + (((0.9426172032116371 + 0.12753189129222975) * \\ & 0.12753189129222975) - (\text{param5} - 0.9102184342379871)))))) + (\text{param5} \wedge (((0.2948398414613985 * \\ & 0.12753189129222975) + (\text{param5} * ((\text{param5} - ((\text{param1} * (\text{param5} - (((\text{param4} + (\text{param2} * (\text{param5} + \\ & (0.8836949198115641 + \text{param5})))) + ((((\text{param4} * (0.30508556782978136 \wedge \text{param3})) \wedge \text{param5}) * \\ & 0.2964602324053818) + \text{param5}) * ((\text{param3} * \text{param1}) + \text{param5}))) + (\text{param5} + \text{param5}))) * \\ & 0.12753189129222975) \wedge ((\text{param5} - \text{param5}) * ((((\text{param5} - ((0.2296132691310917 * \text{param5}) * \end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& \text{param5}) * ((\text{param5} * 0.43940271877009196) * (\text{param1} \wedge \text{param5})) * \text{param5} * (\text{param5} \wedge ((\text{param5} \\
& \wedge (\text{param5} \wedge (\text{param2} + ((\text{param4} * \text{param2}) + ((0.12753189129222975 * (((\text{param1} * \text{param1}) * \\
& 0.12753189129222975) \wedge \text{param4})) * (\text{param3} \wedge (\text{param5} * (0.47927726633903356 * \\
& 0.2964602324053818)))))) + 0.17678031409899764)))) * ((\text{param2} + (\text{param5} \wedge (\text{param1} - \\
& (((0.12753189129222975 + 0.9426172032116371) + \text{param4}) * ((\text{param5} + (((0.2948398414613985 * \\
& (\text{param4} \wedge (\text{param5} * \text{param4})) \wedge \text{param5} + (((0.12753189129222975 * (0.8981426114315137 * \\
& \text{param5})) \wedge ((0.20778049847297186 + 0.1543878852781163) - 0.2964602324053818)) + (\text{param2} - \\
& 0.30508556782978136)) - (0.12753189129222975 + (((\text{param3} \wedge \text{param1}) \wedge ((\text{param2} * \text{param4}) - \\
& 0.9426172032116371)) * \text{param3})))) + \text{param5})))) * (\text{param5} - \text{param5})))) \wedge ((0.12753189129222975 \\
& \wedge (\text{param3} \wedge (((((((\text{param1} * \text{param5}) * \text{param4}) * 0.8918261635717172) * ((\text{param3} \wedge \\
& 0.3268903276615469) \wedge \text{param5})) \wedge (((\text{param5} * \text{param5}) * ((((\text{param5} - \text{param5}) + (\text{param4} \wedge \text{param5})) \\
& * (((((\text{param2} \wedge (0.8608684656608068 + 0.12753189129222975)) - (\text{param5} * 0.12753189129222975)) \\
& + (0.17678031409899764 * \text{param4})) \wedge \text{param5} - (\text{param5} - (\text{param4} + 0.12138948728946097))) * \\
& \text{param1}) + \text{param3}) + (\text{param5} \wedge ((\text{param2} * \text{param1}) + \text{param3}))) * \text{param4})) + \text{param5} \wedge ((\text{param5} - \\
& 0.12753189129222975) + \text{param3})) * (\text{param3} + \text{param5}))) * 0.2964602324053818) \wedge \text{param4} \wedge \\
& (((0.12753189129222975 * 0.30508556782978136) - (0.12753189129222975 \wedge \text{param5})) * \text{param5} * \\
& (\text{param5} * ((((\text{param3} \wedge ((0.12753189129222975 * (\text{param5} \wedge (\text{param3} * (\text{param5} \wedge \\
& (0.12753189129222975 + (((\text{param1} * \text{param4}) * 0.12753189129222975) + 0.43736857172506105)))))) - \\
& 0.17678031409899764) \wedge ((\text{param5} \wedge ((((\text{param5} - (0.8710238344658429 * 0.12138948728946097)) \wedge \\
& \text{param5}) \wedge (\text{param5} \wedge (0.12753189129222975 \wedge \text{param3}))) \wedge ((0.8034816873163503 + \text{param4}) + \\
& \text{param1})) * \text{param3})) - \text{param1})) + 0.24166850681808116) \wedge (((0.30508556782978136 + \\
& ((0.12753189129222975 \wedge \text{param5}) + \text{param4})) + (((\text{param3} \wedge \text{param5}) \wedge ((\text{param5} * \text{param5}) * \\
& (0.9102184342379871 \wedge \text{param3}))) * (\text{param3} \wedge \text{param1}))) * (((\text{param1} * \text{param5}) + (\text{param5} - \\
& 0.12753189129222975)) * \text{param3})) * (\text{param4} - 0.9426172032116371)) - \text{param5})))) \wedge \\
& 0.7784273858210023) + (((((\text{param3} * (((\text{param5} * 0.20957287905819577) * 0.11353021303146793) - \\
& 0.8738104040260011)) * (((0.9309443138257562 * 0.9173991400144423) + (\text{param4} - \\
& 0.9426172032116371)) * \text{param5})) * (\text{param3} + (\text{param1} - \text{param1}))) * (\text{param5} + \text{param3})) + \text{param5})) \\
& + \text{param5})) * \text{param4} * ((((((((\text{param5} - 0.12753189129222975) - ((((\text{param5} + \text{param4}) \wedge ((\text{param5} - \\
& (((0.12753189129222975 \wedge (\text{param5} + \text{param5})) + ((\text{param5} - ((\text{param5} + \text{param1}) * ((((\text{param5} - \\
& ((0.2964602324053818 \wedge (\text{param2} - \text{param2})) * \text{param3})) \wedge (((0.17678031409899764 \wedge ((\text{param5} \wedge \\
& 0.12753189129222975) - 0.12753189129222975) \wedge ((0.12753189129222975 + \text{param3}) * (\text{param5} * \\
& (((\text{param2} * 0.30508556782978136) \wedge ((0.20957287905819577 * (0.9065713433150347 * ((\text{param5} + \\
& 0.2964602324053818) * \text{param5}))) \wedge \text{param5})) * 0.9102184342379871)))) * ((\text{param5} \wedge \\
& (0.12753189129222975 + (((((((\text{param2} * (\text{param5} - ((\text{param5} - ((\text{param5} + \text{param4}) * (\text{param4} * \\
& ((\text{param5} - \text{param3}) - \text{param3})))) + \text{param4}) * \text{param3}))) \wedge \text{param4} + (((0.12753189129222975 * \\
& 0.041673870513345146) + \text{param4}) - 0.12753189129222975)) * \text{param4} * 0.12753189129222975) + \\
& 0.43736857172506105))) + 0.5001686119116552)) + ((\text{param4} * 0.12753189129222975) - (\text{param5} - \\
& \text{param5}))) \wedge \text{param1} * ((\text{param5} - \text{param3}) - 0.9426172032116371)))) * ((0.45324449364030517 - \\
& 0.12753189129222975) * 0.12753189129222975)) - (0.8492537823251377 * 0.2964602324053818))) + \\
& ((\text{param2} * \text{param4}) + (\text{param5} + 0.5001686119116552))) * (0.12753189129222975 + \text{param3})) + \\
& (0.2964602324053818 - 0.12753189129222975) * \text{param5} * 0.12753189129222975) \wedge (\text{param5} + \\
& \text{param3}) \wedge 0.546248466278609) * \text{param1} + \text{param2}) * ((\text{param3} \wedge 0.12753189129222975) + \text{param5})) \\
& * (\text{param5} + 0.12753189129222975)) + \text{param5})) \wedge (\text{param5} + 0.12753189129222975) + \text{param5} - \\
& (\text{param1} * ((((\text{param5} + \text{param4}) \wedge ((\text{param5} - ((0.12753189129222975 \wedge (\text{param5} + \text{param5})) + \\
& ((\text{param5} - ((((\text{param4} - \text{param2}) \wedge 0.5622886590345157) + \text{param1}) * \text{param5})) * \text{param2})) - \\
& (0.8492537823251377 * 0.2964602324053818))) + \text{param5} * (0.12753189129222975 + \\
& (0.11353021303146793 * ((0.2510369980837821 + 0.12753189129222975) * \text{param4})))))) + (\text{param5} - \\
& 0.12753189129222975) * \text{param5} * 0.12753189129222975)) + (0.2964602324053818 + (((\text{param1} * \\
& ((0.8981426114315137 * ((\text{param5} - ((((\text{param4} \wedge ((\text{param5} * 0.17678031409899764) * \text{param5})) * \\
& (0.2948398414613985 * (\text{param1} * (\text{param5} + \text{param5})))) * (0.12753189129222975 - \\
& (0.3624086499434278 - (((0.2964602324053818 * \text{param5}) * ((\text{param2} * \text{param3}) + \text{param5}) - (\text{param5} \\
& * (((((0.12753189129222975 \wedge \text{param5}) \wedge 0.12753189129222975) * ((\text{param2} * \text{param4}) \wedge (((\text{param5} * \\
& (((\text{param1} * \text{param3}) * (((0.9628829214966671 * 0.3366537487048832) \wedge \text{param4}) * \\
& (((((0.12753189129222975 * \text{param1}) * \text{param1}) + \text{param3}) + (((0.2948398414613985 - \\
& 0.9426172032116371) * ((\text{param4} - 0.041673870513345146) \wedge \text{param1}) * 0.6585700018903786)) *
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& (0.2964602324053818 - (\text{param1} - \text{param1}))) * ((0.12138948728946097 * \text{param1}) - \text{param5}) \wedge \\
& (((((\text{param2} - (\text{param3} * 0.12753189129222975)) \wedge (((0.9426172032116371 * ((0.12753189129222975 * \\
& (\text{param1} \wedge (\text{param2} + (\text{param5} \wedge (((\text{param1} \wedge (\text{param5} \wedge \text{param5})) * 0.12753189129222975) + (\text{param5} * \\
& (\text{param5} * ((0.12753189129222975 \wedge (\text{param5} * \text{param3})) * \text{param1})))) * ((\text{param5} * \text{param5}) - \\
& (((\text{param5} - (\text{param3} * (\text{param5} - (\text{param5} * 0.12753189129222975)))) \wedge ((\text{param5} * \text{param5}) * \\
& ((0.9426172032116371 * (\text{param4} - 0.12753189129222975)) \wedge \text{param3}))) * (\text{param3} \wedge \text{param1})))))) \wedge \\
& \text{param5}) \wedge (0.6184839364653852 \wedge \text{param5})) - (\text{param3} - \text{param4}) \wedge ((0.12753189129222975 - \\
& 0.12753189129222975) * \text{param1})) \wedge \text{param5} + 0.12753189129222975 + (0.30508556782978136 \wedge \\
& ((\text{param5} \wedge \text{param5}) \wedge (((0.5001686119116552 - 0.12753189129222975) \wedge (((0.8981426114315137 * \\
& ((\text{param5} - \text{param3}) \wedge \text{param3})) + \text{param3}) \wedge (\text{param5} \wedge (0.6390688537445032 - (0.12753189129222975 \\
& * \text{param3})))) + \text{param2}) * 0.12753189129222975) * \text{param4}) * (0.8738104040260011 * (\text{param1} - \\
& 0.47927726633903356)))))) * 0.8918261635717172) * \text{param2})) * 0.12753189129222975 \wedge \text{param3}) \\
& + \text{param5})) \wedge ((0.12753189129222975 \wedge (\text{param3} \wedge ((((((((((((\text{param5} - ((((\text{param5} + \text{param4}) + \text{param1}) + \\
& \text{param4}) * 0.12753189129222975) * ((0.12753189129222975 * ((\text{param5} + (((0.541570738372512 + \\
& \text{param3}) * 0.12753189129222975) * 0.9534536103654077)) * ((\text{param3} + ((\text{param5} * \\
& 0.9426172032116371) * ((\text{param5} \wedge ((0.12753189129222975 \wedge ((0.12138948728946097 + \text{param5}) + \\
& ((((\text{param5} - ((\text{param3} + (0.267284386412476 * (((\text{param4} * (0.7883788757770255 \wedge (((\text{param5} - \\
& (0.2964602324053818 * ((\text{param2} \wedge \text{param2}) * 0.17678031409899764))) - 0.12753189129222975) - \\
& (0.30189539548194055 * \text{param5})) + \text{param3}))) * ((0.12753189129222975 \wedge (\text{param5} * (\text{param5} * \\
& ((0.12753189129222975 * \text{param3}) + (((\text{param3} * (0.12753189129222975 \wedge ((0.12753189129222975 - \\
& (0.30189539548194055 * \text{param5})) + \text{param3}))) * (((\text{param4} - 0.2964602324053818) - (\text{param5} - \\
& (0.2964602324053818 * (\text{param1} * (\text{param5} \wedge (0.2964602324053818 * (\text{param4} * (\text{param4} * (((\text{param5} \\
& \wedge (0.8738104040260011 + \text{param5})) - (0.2964602324053818 \wedge (0.12753189129222975 \wedge \text{param5}))) + \\
& \text{param5}))))))))) + 0.12138948728946097) - 0.12753189129222975) * ((\text{param5} + \text{param1}) + (\text{param1} * \\
& (\text{param5} * (\text{param5} + 0.12753189129222975)))))) * (\text{param5} * (0.12753189129222975 \wedge ((\text{param2} - \\
& 0.12753189129222975) * ((0.12753189129222975 * \text{param2}) * ((\text{param5} + (\text{param4} * \\
& ((0.12138948728946097 + \text{param5}) + 0.49686621183343416))) + (((\text{param4} + 0.7610260927362196) - \\
& \text{param4}) * (0.49686621183343416 \wedge 0.12753189129222975))))))))) + 0.12138948728946097) - \\
& 0.12753189129222975) * ((\text{param2} + (0.12753189129222975 * (0.7913880149506946 \wedge (\text{param1} - \\
& (0.7982863690034296 \wedge \text{param4})))) \wedge 0.2964602324053818))) * (((\text{param1} * ((0.505430692613157 \wedge \\
& (((((0.12753189129222975 * \text{param2}) * ((\text{param5} * ((((((((\text{param5} - \text{param1}) \wedge ((\text{param5} - \\
& (0.8961794113421723 \wedge \text{param3})) + \text{param3})) \wedge 0.546248466278609) * \text{param5}) + \text{param2}) * ((\text{param3} \wedge \\
& 0.12753189129222975) + \text{param5})) * (\text{param3} - 0.47927726633903356))) + ((\text{param5} + \text{param4}) * \\
& \text{param5})) \wedge (\text{param3} + (((((\text{param5} + 0.900412851795397) * 0.8161647500958845) - (\text{param5} \wedge \\
& ((0.12753189129222975 \wedge 0.026489886221574555) \wedge (0.12753189129222975 + \text{param1})))) + \\
& (0.49686621183343416 * (0.12753189129222975 \wedge \text{param5}))) + \text{param5}) * \text{param2})) + \text{param5}) - \\
& (((0.17678031409899764 - 0.12753189129222975) \wedge (((0.5001686119116552 - 0.12753189129222975) \\
& \wedge ((\text{param5} + 0.12753189129222975) * (0.12753189129222975 \wedge (\text{param5} * (((\text{param5} \wedge \\
& 0.2964602324053818) * ((0.6786983698998827 + 0.1396051919704291) * (\text{param5} + \\
& 0.7769481833550662))) * (((0.12753189129222975 \wedge \text{param5}) - (\text{param3} + (0.13713172396400852 + \\
& (\text{param4} - ((\text{param5} - \text{param5}) + \text{param3})))) + (\text{param3} * ((\text{param2} + \text{param5}) \wedge 0.2964602324053818))) \\
& * (\text{param5} * (0.12753189129222975 \wedge ((\text{param1} - 0.12753189129222975) * ((0.12753189129222975 * \\
& \text{param2}) * ((\text{param5} + \text{param5}) + (((\text{param4} + 0.7610260927362196) - \text{param4}) * (\text{param1} \wedge \\
& 0.12753189129222975))))))))) * \text{param3} + 0.7779135034372614)) + \text{param2})) + \\
& (0.2964602324053818 + (((\text{param3} \wedge (((((0.12753189129222975 \wedge ((\text{param4} - 0.041673870513345146) \wedge \\
& \text{param5})) * \text{param2}) + (\text{param5} * (\text{param3} + ((\text{param5} \wedge 0.12753189129222975) + ((\text{param5} - (\text{param1} + \\
& (0.12753189129222975 + \text{param3}))) - 0.8369002015234749)))) \wedge (((0.12753189129222975 \wedge \\
& 0.12138948728946097) \wedge (\text{param5} - (\text{param3} - \text{param1}))) \wedge (((((0.2964602324053818 \wedge \\
& (((((0.12753189129222975 * ((\text{param5} * ((\text{param5} \wedge (((\text{param1} - \text{param1}) * (\text{param5} - \text{param5})) + \\
& (\text{param1} * ((0.17678031409899764 \wedge (0.12753189129222975 + \text{param5})) + (\text{param5} * \text{param2})))))) - \\
& (0.12753189129222975 + \text{param5})) * \text{param5})) \wedge \text{param3}) \wedge \text{param1}) - \text{param3}) * \\
& (0.12753189129222975 \wedge (((0.04253218081719046 * \text{param5}) * (((\text{param1} + ((\text{param3} * \text{param5}) + \\
& (\text{param5} * (\text{param1} \wedge \text{param5})))) * ((0.17678031409899764 \wedge \text{param5}) + \text{param1})) \wedge \text{param5})) + \\
& ((\text{param5} + 0.12753189129222975) + (\text{param5} \wedge 0.12753189129222975))) + (\text{param5} - \\
& ((0.12753189129222975 * \text{param2}) - ((0.2948398414613985 * (\text{param4} \wedge (\text{param5} * \text{param4}))) \wedge
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& \text{param5})))))) * \text{param3} + (((((\text{param5} * ((\text{param5} - (((0.10739906384953823 - 0.9426172032116371) * \\
& (0.2948398414613985 * (\text{param1} * (\text{param5} + 0.12753189129222975)))) * (\text{param5} - \\
& 0.17678031409899764)) * (\text{param5} * \text{param5})) ^ (\text{param5} + \text{param5})) ^ (((\text{param4} * \\
& 0.6381695753254081) ^ (\text{param5} + 0.12753189129222975)) + \text{param5} - (\text{param5} * \text{param1})) - \\
& (((((\text{param5} + \text{param1}) * \text{param5}) * ((\text{param1} + (\text{param5} ^ 0.002506314173810753)) ^ \text{param3})) * \\
& \text{param2} - \text{param5})) - (((\text{param3} + \text{param2}) - (\text{param5} ^ \text{param3})) ^ (\text{param3} ^ \text{param1})) * \text{param3})) + \\
& \text{param5})) * \text{param1} * 0.12753189129222975)) - 0.12753189129222975)) + \text{param3} - (((\text{param5} + \\
& \text{param5}) + \text{param5}) ^ 0.8710238344658429)))) ^ (\text{param1} - \text{param1})) * \text{param5})) + \\
& (0.12753189129222975 ^ \text{param5})) ^ ((0.30508556782978136 + ((\text{param4} - 0.041673870513345146) + \\
& \text{param4})) + 0.12753189129222975)) * \text{param3} * 0.12753189129222975)) + ((\text{param4} * \text{param2}) + \\
& (0.2964602324053818 + 0.16516101834990116)))) + (((0.8369002015234749 - (\text{param4} * \\
& ((0.17236040069989111 ^ 0.541570738372512) * (\text{param4} ^ ((\text{param5} ^ ((\text{param5} - \\
& 0.12753189129222975) ^ \text{param3})) - 0.12753189129222975)))) * (((\text{param5} - 0.12753189129222975) ^ \\
& (((0.07965637500823064 * \text{param3}) + (((\text{param5} + \text{param5}) - (\text{param5} * (\text{param5} - \\
& 0.13713172396400852))) + (\text{param2} * 0.30508556782978136))) * \text{param2}) - ((((((0.12753189129222975 \\
& * \text{param1}) - (\text{param3} * \text{param3})) * \text{param5}) * ((\text{param1} + (0.12721263980155462 ^ \\
& 0.002506314173810753)) ^ \text{param3})) * \text{param2} - \text{param5})) + (0.12753189129222975 * \text{param5})) * \\
& 0.2964602324053818)))) * ((0.2964602324053818 * (((0.9102184342379871 ^ 0.5001686119116552) ^ \\
& (((\text{param5} - 0.12753189129222975) ^ \text{param1})) * \text{param3}) - 0.12753189129222975)) * \\
& (0.13713172396400852 + ((0.5001686119116552 - 0.12753189129222975) - ((\text{param5} - (\text{param5} * \\
& ((0.12753189129222975 * ((\text{param4} * (0.12753189129222975 * ((\text{param5} * 0.17678031409899764) * \\
& \text{param5}))) + 0.9426172032116371)) ^ (0.2510369980837821 + 0.12753189129222975)))) + \text{param3})))) - \\
& (\text{param4} - 0.041673870513345146)))) + 0.9426172032116371)) + 0.17678031409899764) ^ \text{param5}) * \\
& (\text{param5} ^ 0.12753189129222975)) * \text{param4}) * 0.8918261635717172) * ((\text{param3} ^ \\
& (((0.12753189129222975 * \text{param5}) - 0.9426172032116371) * \text{param5}) * (\text{param5} - \\
& (0.3624086499434278 - \text{param1})))) ^ \text{param5})) ^ (((\text{param5} * \text{param5}) * \text{param5}) * \text{param4})) + \text{param5}) \\
& ^ ((\text{param5} - 0.12753189129222975) + \text{param3})) * (\text{param3} + \text{param5})))) * 0.2964602324053818)) ^ \\
& \text{param4}) ^ (((\text{param5} - (0.12753189129222975 ^ \text{param5})) * \text{param5}) * (\text{param5} * (((\text{param3} ^ \\
& ((0.12753189129222975 * (\text{param5} ^ (\text{param1} + \text{param1}))) - 0.17678031409899764) ^ ((\text{param5} ^ \\
& (((\text{param5} - (\text{param5} - (\text{param5} * (\text{param5} + ((\text{param5} * \text{param5}) * ((0.9426172032116371 * ((\text{param5} ^ \\
& (((0.45324449364030517 - 0.45324449364030517) * \text{param4}) + 0.7779135034372614)) + \\
& 0.12753189129222975)) ^ \text{param3})))))) ^ \text{param5}) ^ (\text{param5} ^ (0.12753189129222975 ^ \text{param3}))) ^ \\
& \text{param5}) * 0.8369002015234749) - \text{param1})) + 0.24166850681808116) ^ ((0.12138948728946097 * \\
& (((\text{param1} * \text{param5}) + (\text{param5} - 0.12753189129222975)) * \text{param3})) * (\text{param4} - \text{param5})) - \\
& \text{param5})))) - (0.0480842470097228 * \text{param1})))) * (0.5125592659758526 * ((0.2236729710311619 - \\
& \text{param5}) - \text{param3})))) ^ 0.12753189129222975)) ^ (((0.12753189129222975 * \text{param2}) * \\
& ((0.04354506094049637 * (0.8738104040260011 * (0.12753189129222975 + \text{param5}))) + ((\text{param5} + \\
& \text{param5}) * \text{param5})) ^ \text{param5}) + \text{param5} - ((0.5001686119116552 - 0.12753189129222975) ^ \\
& ((\text{param3} * \text{param5}) - \text{param3})))) + (\text{param1} + \text{param4})) ^ (\text{param1} - \text{param1})) * \text{param5}) - (((\text{param4} + \\
& 0.6781387355402035) + \text{param5}) + ((0.12753189129222975 * ((0.5694425228055466 + \text{param5}) - \\
& 0.12753189129222975)) - 0.12753189129222975)) ^ ((\text{param1} + \text{param1}) + (0.90650187196969 * \\
& (0.3624086499434278 ^ \text{param1})))))) ^ (\text{param1} - \text{param1})) * \text{param5})) + ((0.12753189129222975 ^ \\
& \text{param5}) - (\text{param3} + (0.13713172396400852 + ((\text{param4} + \text{param4}) - ((\text{param5} - \text{param5}) + \text{param3})))))) \\
& ^ ((0.30508556782978136 + ((\text{param4} - 0.13713172396400852) + \text{param4})) + (((\text{param5} - (\text{param5} * \\
& 0.12753189129222975)) ^ ((\text{param5} * \text{param5}) * ((0.9426172032116371 * (((0.17678031409899764 - \\
& 0.12753189129222975) ^ (((0.5001686119116552 - 0.041673870513345146) ^ ((\text{param5} + \\
& 0.12753189129222975) * (0.12753189129222975 ^ (\text{param5} * \text{param3})))) * \text{param3}) + \\
& 0.7779135034372614)) + 0.12753189129222975)) ^ \text{param3}))) * (\text{param3} ^ \text{param1})))) * \text{param3}) * \\
& 0.12753189129222975) * 0.43940271877009196))) * \text{param5}) * \text{param5}) >= (\text{param4} * \text{param3}))
\end{aligned}$$

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 3:

WHERE



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

$$\begin{aligned}
& (0.10432953971710601 < ((((((param4 * (0.4561230057401422 - ((0.4129097454092311 - param1) - \\
& 0.25610937038407044)))) + param1) - param5) * (0.08986820991385858 - ((param4 - \\
& (((0.5259532388457184 - 0.9861424086055197) * (((param1 + param1) * (((0.23903304738833864 - \\
& param4) * (((0.23903304738833864 - (((0.4129097454092311 - param1) - (0.5260253009583357 * \\
& ((param4 ^ param4) - param5)))) * param2) * (0.4129097454092311 + param1)))) * (((param5 * \\
& ((0.08986820991385858 - 0.23903304738833864) * ((0.5892666173905631 * (param1 - (param1 * \\
& (((param1 * (0.4129097454092311 * (param1 - param5)))) * 0.08986820991385858) * \\
& (((0.5260253009583357 - (0.5260253009583357 * (((param2 * (((0.08986820991385858 - param5) * \\
& 0.08986820991385858) - param5) + (param2 * 0.10432953971710601))) - 0.23903304738833864) + \\
& 0.5259532388457184) * ((param4 + (param5 - (((param4 - 0.4129097454092311) - (param5 * (param4 * \\
& (((param1 * 0.9203693324405398) - param5) - (param3 + (param2 * (0.4129097454092311 * \\
& 0.08986820991385858)))))) + (((param2 * param1) * (0.08986820991385858 * (param4 + \\
& 0.5260253009583357))) - param4)))) * (0.046746753100012306 - (param1 - param5)))) - \\
& 0.4561230057401422)) * (0.2631614179526264 * 0.4129097454092311)) * param4) - param5)))) * \\
& (param4 ^ 0.5260253009583357))) * (0.4129097454092311 * 0.8678152763900171)) * (((param1 * \\
& (((param5 - 0.9307564963571658) - (((0.2631614179526264 - (0.5260253009583357 - \\
& ((0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 * param5)) * (param5 * ((0.4129097454092311 - \\
& param1) * 0.2631614179526264)))) - (param4 + 0.4129097454092311)) + param1) + param1) - \\
& (0.4561230057401422 * 0.4129097454092311)) - (0.5260253009583357 * ((0.5260253009583357 * \\
& (((((param1 + 0.08986820991385858) * 0.3633839612056994) * ((param1 - (0.5260253009583357 - \\
& param4)) * ((param4 ^ 0.5260253009583357) - (((0.5260253009583357 - param5) - \\
& (0.23903304738833864 * ((0.5260253009583357 - (0.5036559571121977 ^ 0.4561230057401422)) - \\
& (0.5260253009583357 * param4)))) - (((0.23903304738833864 - (((0.4129097454092311 - param1) - \\
& (0.5260253009583357 * ((param4 ^ param4) - param5)))) * param2) * (((0.2631614179526264 - \\
& (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) - ((param4 ^ (0.5260253009583357 * \\
& (((0.5260253009583357 * 0.08986820991385858) * (0.2631614179526264 * param4)) - (param5 * \\
& 0.2524467858467919)) + 0.4561230057401422))) + 0.4129097454092311)) + param1))) - \\
& 0.5260253009583357) + 0.4129097454092311)) - (((param5 * param4) * (param3 ^ \\
& 0.23903304738833864)) * (param4 * ((0.5260253009583357 + 0.08986820991385858) - param1)))) - \\
& (param4 ^ ((param4 - (((param1 - (0.4129097454092311 * (((param2 - param5) + \\
& 0.08986820991385858) * 0.4129097454092311) - param2)))) * 0.3633839612056994) * \\
& 0.4561230057401422) * param5)) * (param5 + (param2 - (param5 - (param4 * (0.4129097454092311 - \\
& 0.5260253009583357)))))) - 0.4129097454092311) - ((param4 * (param1 * (((0.5260253009583357 \\
& - param5) - ((param2 - param1) + param5)) * (0.5260253009583357 ^ (0.9549881399097092 * \\
& param3))) - (0.5260253009583357 + ((param2 - param2) - (param5 + 0.2631614179526264)))) + \\
& param4)) ^ (((0.4129097454092311 - 0.5260253009583357) * param4) - param5) + \\
& (((0.4129097454092311 * (((param2 * 0.08986820991385858) + (((param1 - (param4 * (param5 - \\
& ((0.2631614179526264 - (((param2 * ((0.4129097454092311 * ((0.4129097454092311 + \\
& 0.4129097454092311) - (param5 * (((0.08986820991385858 * (param1 - (((param2 * ((param1 * \\
& param4) - param4)) - (0.010859858945397316 ^ (((((param1 - (param4 * 0.4129097454092311)) + \\
& param5) * (0.4129097454092311 * ((param1 * param4) * (param2 - param5)))) - \\
& 0.23903304738833864) + param4) * 0.23903304738833864))) + (0.2631614179526264 - (((param1 + \\
& param1) * (((0.23903304738833864 - param4) * (param4 * (((param5 - (((param5 - \\
& (((0.10618836870079884 - 0.2631614179526264) - param3) + (param1 * ((0.4129097454092311 - \\
& (0.2631614179526264 - (0.19988735660278567 ^ ((0.4129097454092311 * (param1 - \\
& (0.5260253009583357 * (((((param2 * (((param5 + (0.5260253009583357 - 0.2631614179526264)) * \\
& 0.4129097454092311) - ((param3 * 0.8678152763900171) + param1)) * 0.08986820991385858)) - \\
& param2) + (0.5260253009583357 - param5)) * ((0.5260253009583357 * (param2 * (param4 * \\
& (((0.23903304738833864 + 0.4129097454092311) - 0.5260253009583357) * (param4 + \\
& 0.5260253009583357)))) - param5)) - ((0.2631614179526264 - (param5 * ((0.4129097454092311 * \\
& (((param1 - param4) * (((((param3 + param1) * 0.4129097454092311) * ((param1 * param2) - param2) \\
& + (param4 - param1))) - (((((param2 * (((param5 * param4) - (((0.08986820991385858 * (param1 - \\
& 0.6220545447343789)) * 0.08986820991385858) - (param1 + ((0.23903304738833864 - param5) +
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& (((\text{param5} - ((0.08986820991385858 * (\text{param5} * \text{param5})) * \text{param4})) * \text{param4}) - (\text{param2} + \\
& (((0.08986820991385858 * (\text{param5} + \text{param4})) - (0.5260253009583357 - (((0.38019129139080465 * \\
& (((\text{param5} * \text{param5}) * (0.6763397640527387 * (\text{param3} + \text{param2}))) - \text{param5})) - \\
& ((0.25083647293625855 + \text{param5}) * (\text{param2} - \text{param5}))) + ((\text{param5} - (0.2631614179526264 - \\
& (((\text{param4} ^ (0.5260253009583357 * (\text{param1} - (0.08986820991385858 * ((\text{param1} * \text{param4}) * \\
& 0.23903304738833864)))))) * ((0.5260253009583357 * ((0.5260253009583357 * (\text{param4} + \\
& 0.4129097454092311)) * 0.08986820991385858)) * 0.08986820991385858) - 0.4129097454092311))) - \\
& (\text{param2} * (0.5260253009583357 - 0.2631614179526264)))))) - \text{param2}) - (\text{param5} + \\
& 0.4129097454092311)))) + 0.5260253009583357)))) - \text{param5}) - (0.08986820991385858 - ((\text{param4} - \\
& (((0.5259532388457184 - (\text{param5} - ((\text{param5} * \text{param2}) * ((\text{param1} - \text{param4}) * (0.4129097454092311 \\
& * ((0.9770778713185043 * 0.4561230057401422) * (((\text{param2} - (((0.02246549004799392 * \\
& 0.08986820991385858) - 0.08986820991385858) * ((0.08986820991385858 * (0.4561230057401422 * \\
& 0.08986820991385858)) - \text{param5})) * \text{param4})) * ((0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 - \\
& \text{param1})) * (((((\text{param2} - (0.08986820991385858 * (((\text{param1} ^ \text{param3}) * ((\text{param4} ^ (\text{param1} - \\
& (((((0.5260253009583357 * ((0.4129097454092311 - \text{param4}) - 0.4129097454092311)) - (((((\text{param2} - \\
& ((\text{param1} * ((\text{param1} ^ 0.7447952188959325) - 0.1858585977149707)) - \text{param5})) - (\text{param5} - \text{param4})) \\
& + ((\text{param1} - (((\text{param3} - \text{param5}) - \text{param4}) - (\text{param4} - (\text{param1} - \text{param5})))) - (\text{param4} - (\text{param4} ^ \\
& \text{param5})))) * 0.5260253009583357) * (((0.6763397640527387 * (\text{param3} + \text{param2})) * \\
& ((0.23565331262003797 - (\text{param1} - ((\text{param5} - (\text{param1} + (((\text{param4} ^ 0.10432953971710601) - \\
& (0.2631614179526264 - (((\text{param4} ^ 0.4561230057401422) * (\text{param1} - (\text{param4} - \text{param5}))) - \text{param1}))) \\
& + 0.4129097454092311))) + \text{param1}))) - (0.5260253009583357 * (0.4129097454092311 - \text{param5}))) * \\
& 0.08986820991385858)) - \text{param5})) + (0.4561230057401422 - ((0.5259532388457184 * (\text{param4} - \\
& (\text{param4} * 0.4129097454092311))) * \text{param1}))) * (((0.8004188888636184 * 0.4129097454092311) - \\
& \text{param3}) + (\text{param4} - (\text{param1} - \text{param1}))) * ((\text{param1} * (\text{param1} - \text{param1})) - \text{param3})) - \text{param5}))) * \\
& \text{param1}) - (0.4129097454092311 ^ ((0.5260253009583357 * (((0.4129097454092311 * \text{param4}) - \\
& (0.08986820991385858 ^ ((((((0.08986820991385858 * 0.4129097454092311) * \text{param1}) + \\
& (0.5260253009583357 * 0.5260253009583357)) * ((0.5260253009583357 - ((\text{param1} * \\
& 0.4129097454092311) - \text{param1})) - (((\text{param1} - 0.4129097454092311) + 0.404294718089931) * \\
& ((0.046009461967772336 + 0.4129097454092311) * \text{param5})) * \text{param4}))) - \text{param5}) + \\
& ((0.5259532388457184 - \text{param1}) - (0.48784719904745455 ^ \text{param3})))))) + (0.4129097454092311 - \\
& (\text{param1} * \text{param1}))) * (0.23903304738833864 - \text{param1}))) - \text{param5})))))) + (\text{param1} - \text{param4})) * \\
& (\text{param5} * 0.5260253009583357) * 0.08986820991385858) * \text{param4}))) * 0.5260253009583357)))) * \\
& ((((((0.5260253009583357 + \text{param1}) * (((0.23903304738833864 - \text{param4}) * (((0.23903304738833864 \\
& - (0.4129097454092311 * (((0.2631614179526264 - (0.5260253009583357 - (\text{param1} - \text{param4}))) - \\
& ((((((\text{param5} + \text{param1}) * (\text{param1} * \text{param1})) - (\text{param4} ^ (0.5260253009583357 * (\text{param1} - \\
& 0.08986820991385858)))) * \text{param1}) + 0.4129097454092311) * ((\text{param5} * (\text{param4} - \text{param1})) * \\
& 0.08986820991385858) + 0.4129097454092311)) + \text{param1}))) * (((\text{param4} * ((0.08986820991385858 - \\
& 0.32253075171639245) * ((\text{param1} - \text{param5}) * (\text{param1} - (0.4129097454092311 + \\
& 0.5260253009583357))) * (\text{param4} ^ 0.5260253009583357)))) * \text{param1}) * (\text{param4} * (((((\text{param5} * \\
& (((((\text{param5} * (0.2631614179526264 * \text{param4})) - ((0.4129097454092311 * 0.5260253009583357) * \\
& 0.2524467858467919) + 0.4561230057401422) * (0.5259532388457184 * ((\text{param2} * (\text{param5} * \\
& \text{param1})) - (\text{param4} * 0.4129097454092311)))) * (((\text{param5} - \text{param5}) - \text{param5}) - \\
& ((0.5260253009583357 * (((0.5260253009583357 - \text{param5}) - ((\text{param1} - (((0.4129097454092311 - \\
& \text{param5}) - 0.4129097454092311) - (\text{param4} - (\text{param1} - (((0.5260253009583357 - \text{param5}) - \\
& (0.23903304738833864 * ((0.5260253009583357 - (0.5036559571121977 ^ ((0.4129097454092311 * \\
& ((0.23903304738833864 * (\text{param4} ^ 0.10432953971710601)) * \text{param1})) - \text{param4}))) - \\
& (0.5260253009583357 * \text{param4})))) - ((\text{param5} - \text{param4}) + (\text{param1} - (((\text{param5} - (\text{param5} + \text{param5})) * \\
& 0.08986820991385858) * 0.5260253009583357)))) - (\text{param1} - (0.5260253009583357 - \text{param1}))) - \\
& (\text{param4} ^ (0.23903304738833864 * (\text{param1} + (((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) * \\
& \text{param4}) - 0.4129097454092311) - \text{param2})))))) - (\text{param4} - (\text{param4} ^ \text{param5})))) * \\
& ((0.5260253009583357 - (((0.08986820991385858 * 0.5260253009583357) - \text{param5}) + \\
& 0.4129097454092311) * \text{param5})) - (\text{param4} ^ (0.32253075171639245 * ((\text{param1} * \\
& (0.4129097454092311 * ((\text{param5} - (\text{param5} * (\text{param2} - 0.4129097454092311))) * \text{param5}))) + (\text{param2} \\
& - (0.8155577995389486 - (\text{param4} * ((\text{param1} * (0.5260253009583357 ^ 0.5260253009583357)) - \\
& ((0.23903304738833864 * (((0.5260253009583357 - (0.4129097454092311 * ((0.4240044709261719 *
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& (0.4129097454092311 * (\text{param5} * (0.5260253009583357 - 0.2631614179526264)))) * ((\text{param1} * \\
& (0.36792598581980174 - (\text{param4} * ((0.4129097454092311 * ((\text{param5} * ((0.08986820991385858 + \\
& \text{param5}) - \text{param3})) - (((0.5260253009583357 - \text{param5}) - (0.23903304738833864 * \\
& ((0.23903304738833864 + 0.08986820991385858) - (\text{param4} \wedge (0.5260253009583357 - (\text{param1} - \\
& (\text{param4} - \text{param5})))))) - ((\text{param5} - \text{param4}) + 0.4129097454092311)) - (((\text{param5} * \text{param4}) * (\text{param3} \\
& \wedge 0.23903304738833864)) * (\text{param4} * ((0.5260253009583357 + 0.08986820991385858) - \text{param1})))))) - \\
& \text{param5}))) * (0.08986820991385858 * 0.4129097454092311)))) * (0.4129097454092311 + (\text{param4} + \\
& \text{param4})) * (0.5260253009583357 * 0.08986820991385858) - \text{param3})) * \text{param1})))))) * \\
& 0.08986820991385858) - \text{param2})) - (\text{param1} - \text{param1})))) + \text{param1} * ((\text{param4} - \text{param2}) * ((\text{param5} * \\
& (\text{param5} * (((((0.32253075171639245 * (\text{param5} + (\text{param4} * ((\text{param4} + \text{param5}) - \\
& (((0.4129097454092311 * \text{param1}) * \text{param5}) - \text{param4})))))) - \text{param5}) \wedge 0.4390318470456087) * \\
& (((\text{param1} + (\text{param1} - 0.2631614179526264)) * (0.06407120149638246 * 0.9687348592565742)) - \\
& (0.4129097454092311 * (((\text{param1} * ((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) * \\
& 0.08986820991385858)) - (\text{param5} - 0.7928972653276046)) + 0.5260253009583357)))) * \text{param1}))) - \\
& 0.4129097454092311)) - \text{param2}) - \text{param5})))) - \text{param5} + 0.4129097454092311 * (((((\text{param5} - \\
& (0.2631614179526264 - (((\text{param4} \wedge 0.4561230057401422) * (\text{param1} - (\text{param4} - \text{param5}))) - \text{param1}))) \\
& * ((\text{param1} * (((\text{param1} * (0.4129097454092311 + (0.3877346325120986 * 0.08986820991385858))) - \\
& \text{param2}) - \text{param5})) - 0.2631614179526264)) * \text{param1}) - 0.5260253009583357) * \\
& (0.14061671983844615 + (0.4129097454092311 * (\text{param1} * 0.08986820991385858)))))) * \text{param1}))) - \\
& \text{param2}) - \text{param5}) - \text{param1})) * 0.08986820991385858) * \text{param4})))) * 0.4129097454092311 - \\
& \text{param5} * (0.2631614179526264 - \text{param5})) - (((0.5260253009583357 * (\text{param4} * \\
& 0.4561230057401422)) * (((((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) - \text{param5}) * \text{param4}) * \\
& ((\text{param1} - 0.4129097454092311) * 0.08986820991385858)) - \text{param3})) * (\text{param2} * (((\text{param4} * \\
& \text{param4}) * (((\text{param1} * \text{param3}) - 0.5260253009583357) * (\text{param4} + 0.5260253009583357))) - \\
& ((0.4129097454092311 * 0.4561230057401422) * (\text{param5} * (((\text{param2} * 0.4129097454092311) + \\
& (\text{param2} * (((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) * \text{param1}) * 0.5260253009583357)))) - \\
& (((((\text{param1} * 0.08986820991385858) - ((0.5260253009583357 - \text{param1}) - 0.5260253009583357)) * \\
& ((0.08986820991385858 - (\text{param5} \wedge 0.9309844525280271)) - 0.4129097454092311)) - (\text{param4} - \\
& 0.5260253009583357)) * \text{param5})))))) - (\text{param5} + ((0.9183998368520205 * \text{param1}) - \text{param4}))) - \\
& (\text{param2} * 0.5260253009583357))) + (\text{param4} - (((0.2631614179526264 \wedge ((\text{param4} \wedge \\
& 0.08986820991385858) - (0.4129097454092311 - 0.4129097454092311))) * ((0.8507921806298667 - \\
& (0.4129097454092311 * (\text{param5} - \text{param5}))) * ((\text{param1} * \text{param1}) * \text{param2}))) * \\
& (((0.4129097454092311 * 0.08986820991385858) * (((\text{param1} * (\text{param1} - (0.4129097454092311 + \\
& 0.10432953971710601))) * (\text{param4} \wedge 0.5260253009583357)) * (\text{param1} - (0.5129727644910058 * \\
& ((0.5260253009583357 - 0.8480843367369568) + 0.4129097454092311))) - (((\text{param4} \wedge \\
& (0.4129097454092311 - (((((\text{param5} * (\text{param5} \wedge 0.2884695269456382)) - (\text{param4} * \\
& 0.4129097454092311)) - ((\text{param5} - \text{param4}) - (0.5260253009583357 * (((((0.4129097454092311 + \\
& \text{param1}) * (\text{param1} * \text{param1})) - (\text{param4} \wedge (0.5260253009583357 * (\text{param1} - \\
& 0.08986820991385858)))) * \text{param1} + 0.4129097454092311) * ((\text{param5} * (\text{param4} - \text{param1}))) * \\
& 0.08986820991385858)))) - (((0.5260253009583357 - 0.23903304738833864) - 0.5260253009583357) \\
& * ((0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) * (((0.2631614179526264 \wedge \\
& \text{param3}) * (\text{param1} - \text{param1})) - (\text{param4} \wedge (((0.5260253009583357 - 0.23903304738833864) - \\
& 0.5260253009583357) * ((0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) * \\
& \text{param1})))))) \wedge \text{param1} - (0.6565744026171978 \wedge (0.08986820991385858 - \text{param1})))) * \text{param2}) - \\
& 0.5260253009583357) * \text{param5})))) - \text{param3})) - (\text{param5} + \text{param2})))) - (0.5260253009583357 * \\
& (((((\text{param2} * (0.4129097454092311 * \text{param5})) - \text{param2}) + (\text{param4} - ((0.5260253009583357 - \\
& (0.4129097454092311 - (((0.23903304738833864 - (((0.4561230057401422 * \text{param4}) * \text{param5}) * \\
& ((\text{param1} * 0.2631614179526264) * ((0.23903304738833864 - (((\text{param1} * 0.4129097454092311) - \\
& \text{param4}) * (0.4129097454092311 * \text{param5})) + 0.5260253009583357) \wedge 0.4129097454092311)) - \\
& \text{param5})))) * (0.4129097454092311 * ((\text{param5} + 0.4129097454092311) * (\text{param4} * ((\text{param1} - \\
& (((\text{param1} - \text{param5}) - (0.5260253009583357 * ((\text{param1} * \text{param4}) * ((0.5260253009583357 * \text{param4}) \\
& * (((\text{param1} * ((0.5260253009583357 - ((\text{param1} * ((\text{param1} * (\text{param1} - (\text{param2} * \\
& (((0.5260253009583357 - (\text{param4} * ((\text{param4} * (((\text{param1} - \text{param4}) * (0.33647273108946774 - \\
& 0.404294718089931)) * (((\text{param5} - (((\text{param5} - (((0.10618836870079884 - 0.23903304738833864) - \\
& \text{param3}) + (((\text{param4} + \text{param5}) * 0.08986820991385858) - 0.4390318470456087)) * \text{param5}))) -
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& 0.4129097454092311) + ((\text{param4} * ((0.4129097454092311 - 0.5260253009583357) * \\
& (0.23903304738833864 + 0.5260253009583357))) - (0.2631614179526264 - \text{param1})))) * \\
& 0.4129097454092311) * \text{param1})) - (\text{param4} * (\text{param5} - \text{param4})))) - (0.5260253009583357 - \\
& \text{param4})))) + \text{param1} * (((\text{param1} * (((\text{param1} * (\text{param1} - (0.5260253009583357 * (\text{param2} - \\
& \text{param5})))) - \text{param5}) * 0.08986820991385858)) * 0.08986820991385858) + 0.4129097454092311)) - \\
& (0.4129097454092311 * \text{param4})))) * \text{param5})) * \text{param1})) - ((0.4561230057401422 * \\
& 0.31098240088358553) * 0.5260253009583357))) * (0.23903304738833864 - \text{param4})) * \text{param4})) * \\
& (\text{param5} - \text{param5})))) + \text{param1})) - ((0.4129097454092311 - \text{param1}) - 0.25610937038407044)))) - \\
& \text{param5} + (0.5260253009583357 - (\text{param4} ^ (0.5260253009583357 ^ 0.9301364846500965)))) - \\
& (0.23903304738833864 * (0.4129097454092311 - \text{param1})))) * (\text{param1} * \text{param2})) - (\text{param1} * \\
& (\text{param5} + 0.4129097454092311)) + \text{param1})))) * ((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) * \\
& 0.08986820991385858)))) + \text{param1})) + \text{param1})))) * 0.08986820991385858)))) * (0.5129727644910058 \\
& ^ (\text{param5} - \text{param1})) - (\text{param1} - ((0.5259532388457184 - \text{param1}) * (0.8300619707245618 - (\text{param4} \\
& * (0.4129097454092311 * (\text{param1} - (0.4129097454092311 - \text{param5})))))))) * (0.08986820991385858 - \\
& \text{param5})) - 0.1770129560002397) + ((\text{param4} * ((0.4129097454092311 - (\text{param3} - \text{param4})) * (\text{param4} \\
& + 0.5260253009583357))) - 0.3633839612056994))) * 0.4561230057401422) * \text{param1} - \\
& 0.5260253009583357) * (0.14061671983844615 + (((0.2631614179526264 - ((0.4129097454092311 * \\
& \text{param5} - \text{param1})) - (\text{param5} - \text{param1})) + 0.23903304738833864) ^ \text{param3})))) * \text{param1})) - (((\text{param1} \\
& * \text{param1}) * 0.08986820991385858) * \text{param5})))) * \text{param2} * (0.4129097454092311 - \\
& 0.5260253009583357)) - (((\text{param1} * 0.08986820991385858) - (0.5260253009583357 * ((\text{param2} * \\
& ((\text{param2} - \text{param1}) * ((0.4129097454092311 * (\text{param1} - \text{param1})) * \text{param4})))) - \text{param5}))) * \\
& (0.4129097454092311 * \text{param5})))) * \text{param4})) - \text{param5} + 0.4129097454092311 - \text{param4})) * \\
& \text{param4})))) - (0.5260253009583357 + ((\text{param4} * \text{param1} - ((((((0.6763397640527387 * (\text{param3} + \\
& \text{param2})) * \text{param4} * 0.08986820991385858) + (0.4129097454092311 + (\text{param4} * (\text{param5} - \\
& ((0.4129097454092311 + (\text{param4} * (\text{param1} - ((0.4129097454092311 - \text{param5}) + (\text{param5} + \\
& \text{param2})))) * ((0.5260253009583357 + 0.4129097454092311) * (((\text{param1} * ((\text{param1} - \\
& 0.4129097454092311) * ((0.4129097454092311 * 0.08986820991385858) - (0.4129097454092311 - \\
& (((0.08986820991385858 * ((\text{param5} - (\text{param1} * (((0.5260253009583357 * ((0.4129097454092311 * \\
& ((\text{param1} * (\text{param4} * \text{param4})) * (((\text{param1} * (0.2631614179526264 - \text{param1})) - ((\text{param1} * \\
& 0.08986820991385858) * (0.23565331262003797 * \text{param1})))) - \text{param5}))) - \text{param5} + \text{param1})) * \\
& 0.08986820991385858) - (\text{param1} - 0.02246549004799392)) - \text{param1} - ((\text{param4} * \\
& 0.08986820991385858) - 0.08986820991385858)))) * \text{param4})) - \text{param5} + 0.4129097454092311) + \\
& \text{param5}))) - ((\text{param1} - \text{param3} - \text{param1}))) * 0.08986820991385858) * \text{param4})))) * \text{param1} ^ \\
& 0.5655964742486245)))) * (((0.5260253009583357 * ((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) - \\
& 0.13405557561227843)) - \text{param5}) * 0.08986820991385858) * 0.5260253009583357) * (\text{param5} - \\
& \text{param5})) * \text{param5} * (0.5260253009583357 - (0.4129097454092311 * 0.4129097454092311)))) - \\
& (\text{param1} - \text{param2})) - (0.48784719904745455 ^ \text{param3})))) + (((((\text{param3} + \text{param1}) \\
& 0.4129097454092311) * (((\text{param1} * (0.4129097454092311 - \text{param5})) - \text{param2}) + (\text{param4} - \text{param5}))) \\
& - ((((((\text{param3} * (((\text{param2} - \text{param1}) * ((0.4129097454092311 * (\text{param1} - \text{param1})) * ((\text{param5} * \\
& (0.08986820991385858 - (0.2631614179526264 - \text{param5})) - \text{param4})) - (0.010859858945397316 ^ \\
& (((((\text{param1} - (\text{param4} * 0.4129097454092311)) + \text{param5}) * (0.4129097454092311 * ((\text{param1} * \\
& \text{param4}) * (\text{param2} - (((\text{param1} * 0.08986820991385858) - (0.5260253009583357 * \\
& (((0.23903304738833864 - \text{param3}) - 0.4129097454092311) - (\text{param4} - ((0.5260253009583357 - \\
& \text{param5}) * 0.5260253009583357))) * 0.08986820991385858) - 0.4129097454092311))) * (\text{param5} * \\
& 0.02246549004799392)) - (((\text{param2} * (\text{param1} * \text{param5})) - (\text{param4} - \text{param5})) - (\text{param1} * \\
& 0.3780725439074498)))))) - 0.23903304738833864) + \text{param4}) * (0.08986820991385858 * \text{param5})))) \\
& * \text{param1})) * 0.4129097454092311) - \text{param1} * (0.2631614179526264 - \text{param5})) - \\
& (0.23903304738833864 * (0.5260253009583357 - (\text{param3} * \text{param4})))) - (\text{param5} + \\
& 0.32253075171639245)) - (((\text{param1} - \text{param1}) - (((0.5260253009583357 * ((0.2631614179526264 - \\
& (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) * 0.08986820991385858)) * 0.08986820991385858) + \\
& ((\text{param2} - \text{param5}) - (0.23903304738833864 - (((\text{param2} - (((\text{param4} - 0.08986820991385858) - \\
& 0.1770129560002397) + (((\text{param4} * \text{param4}) * (((\text{param1} * \text{param3}) - 0.5260253009583357) * (\text{param4} \\
& + 0.5260253009583357))) - ((0.4129097454092311 * 0.4561230057401422) * (\text{param5} * (((\text{param2} * \\
& 0.4129097454092311) + (\text{param2} * (((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) * \text{param1}) * \\
& 0.5260253009583357)))) - (((0.5260253009583357 - ((0.5260253009583357 - \text{param1}) -
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& 0.5260253009583357)) * ((0.08986820991385858 - (\text{param5} \wedge \text{param1})) - 0.4129097454092311)) - \\
& (\text{param4} - ((\text{param4} \wedge \text{param4}) - \text{param5}))) * \text{param5})))) + (((\text{param3} * 0.6493137074653471) * \\
& \text{param4} * 0.08986820991385858) - \text{param1})) * (((\text{param1} + 0.404294718089931) * \\
& 0.3633839612056994) * ((((((0.23903304738833864 - \text{param4}) - 0.5260253009583357) * (\text{param4} + \\
& 0.5260253009583357)) - (0.5260253009583357 - \text{param1})) * ((\text{param4} \wedge 0.4561230057401422) - \\
& ((\text{param4} - (((\text{param5} * \text{param4}) * (0.4129097454092311 * \text{param1})) * (\text{param4} * \\
& ((0.5260253009583357 + 0.08986820991385858) - ((\text{param4} * (0.5260253009583357 - \\
& ((0.4129097454092311 - \text{param5}) - (((\text{param1} * (\text{param1} - (0.5260253009583357 * (\text{param4} - \\
& \text{param5})))) - (\text{param1} - (0.5260253009583357 * 0.880021189977011)))) + ((((\text{param1} * \\
& (0.4129097454092311 - (\text{param1} * \text{param4}))) * 0.08986820991385858) * \text{param5}) - \\
& (0.4129097454092311 - ((\text{param1} - \text{param5}) + 0.08986820991385858))) - (0.4129097454092311 + \\
& (((0.5260253009583357 * (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) * \text{param1}) + \text{param4})))) * \\
& ((\text{param1} - (0.23903304738833864 * 0.4129097454092311)) * \text{param5})))) + \text{param1})))) - (\text{param4} \wedge \\
& (0.32253075171639245 * (\text{param5} + (0.32253075171639245 - (\text{param5} - (0.4129097454092311 * \\
& 0.4129097454092311)))))) - 0.4129097454092311)))) * 0.5260253009583357)) * ((\text{param4} - \\
& \text{param5}) * \text{param3})) - (0.4129097454092311 - (((\text{param4} \wedge 0.4561230057401422) * (\text{param1} - (\text{param4} - \\
& \text{param5})) - \text{param1})))) * 0.08986820991385858) - 0.23903304738833864) + \text{param4} * \\
& (0.08986820991385858 * ((\text{param1} * (\text{param1} - \text{param2})) - 0.5260253009583357)))) - \text{param5} + \\
& 0.4129097454092311) * ((((\text{param5} - (((\text{param5} - (((0.10618836870079884 - 0.2631614179526264) - \\
& \text{param3}) + (\text{param1} * (((0.4129097454092311 - (0.2631614179526264 - (0.19988735660278567 \wedge \\
& ((0.4129097454092311 * (\text{param1} - (0.5260253009583357 * ((((\text{param2} * (((0.5260253009583357 - \\
& (0.4129097454092311 - (((0.23903304738833864 - (((0.4561230057401422 * \text{param4}) * \\
& (((((0.4561230057401422 - (0.23903304738833864 * (((0.08986820991385858 * 0.5027105326316682) \\
& + \text{param5}) - \text{param5}) * ((\text{param5} - 0.2631614179526264) * 0.08986820991385858)))) - \text{param2}) - \\
& (0.4129097454092311 - (\text{param4} - (\text{param4} \wedge 0.5260253009583357)))) + ((((\text{param4} * \text{param1}) - \\
& (((0.4129097454092311 + (0.4129097454092311 + (\text{param4} * (\text{param5} - ((0.24687035963857584 + \\
& (\text{param4} * (\text{param1} - ((((\text{param3} + \text{param5}) * ((\text{param2} * (((0.5260253009583357 - \\
& (0.4129097454092311 - (((((0.4129097454092311 * 0.4129097454092311) - ((((\text{param5} - \text{param5}) * \\
& (\text{param3} + (\text{param2} * (0.4129097454092311 * 0.08986820991385858)))) * \text{param4}) * ((((\text{param2} - \\
& (0.23903304738833864 * ((\text{param1} * 0.9261542340508375) * ((\text{param4} + 0.4129097454092311) * \\
& \text{param1})))) - \text{param2}) - ((0.5260253009583357 * 0.08986820991385858) * (0.2631614179526264 * \\
& \text{param4}))) + (((0.0165311545761464 - 0.03992115766264637) - \text{param4})) * \text{param2})) * ((\text{param1} * \\
& 0.2631614179526264) * ((0.23903304738833864 - (((\text{param1} * (0.4129097454092311 * \text{param5})) + \\
& \text{param5}) \wedge 0.4129097454092311)) - \text{param5})))) * (0.4129097454092311 * ((\text{param5} + \\
& 0.4129097454092311) * ((\text{param1} * (((0.5260253009583357 + ((0.5260253009583357 - (\text{param2} - \\
& (\text{param5} - 0.4129097454092311))) - (((0.08986820991385858 * (\text{param3} - 0.6220545447343789)) * \\
& 0.08986820991385858) - 0.2631614179526264))) * 0.5260253009583357) + (\text{param1} * \\
& (0.4129097454092311 * (\text{param1} * (((\text{param2} * ((0.4129097454092311 * ((0.4129097454092311 + \\
& 0.4129097454092311) - (0.5260253009583357 * (((0.5260253009583357 - (0.5260253009583357 * \\
& (\text{param4} - (0.9203693324405398 * 0.08986820991385858)))) * ((\text{param3} + ((\text{param1} - \text{param1}) * \\
& \text{param4})) * 0.07815399364825237)) - \text{param5})))) * \text{param4})) - \text{param1}) + (\text{param2} * \\
& (((((0.4561230057401422 * 0.4129097454092311) * \text{param4}) - 0.4129097454092311) - \text{param2}) - \\
& (0.4561230057401422 * (((\text{param1} - (0.5260253009583357 - \text{param1})) * 0.4129097454092311) - \\
& 0.4129097454092311)))))) - (0.23903304738833864 - (0.2631614179526264 - \text{param1})) - \\
& (0.5260253009583357 * (\text{param4} - ((\text{param1} * 0.4129097454092311) - (0.4129097454092311 * (\text{param5} \\
& + 0.08986820991385858)))))) - (\text{param1} - (0.5260253009583357 * \text{param4})))) - \text{param5} + \text{param4}))) - \\
& (0.23903304738833864 * (0.4129097454092311 - \text{param1})) * (\text{param4} - \text{param5})) * \\
& 0.08986820991385858)) - \text{param2}) - (0.23903304738833864 * (((\text{param1} * \text{param3}) * \\
& 0.08986820991385858) - (0.5260253009583357 - 0.5260253009583357)))) - \text{param5} + (\text{param5} + \\
& \text{param2})))) * ((\text{param5} + 0.4129097454092311) * (((\text{param1} * (0.23903304738833864 - (\text{param1} * \\
& 0.5260253009583357))) * 0.08986820991385858) * \text{param4})))) * \text{param1} \wedge 0.5655964742486245)) - \\
& 0.03992115766264637) - \text{param4})) * 0.4129097454092311) * ((\text{param1} * 0.2631614179526264) * \\
& ((0.23903304738833864 - ((((\text{param1} * 0.4129097454092311) - (\text{param2} * (0.5260253009583357 + \\
& 0.08986820991385858))) * 0.02246549004799392) + 0.4129097454092311) \wedge 0.4129097454092311)) - \\
& \text{param5})))) * (0.4129097454092311 * (((0.23903304738833864 - \text{param4}) + 0.4129097454092311) *
\end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& ((\text{param1} * (((((0.5260253009583357 + ((0.5260253009583357 - (\text{param2} - (\text{param5} - \\
& 0.4129097454092311)))) - (((0.08986820991385858 * (\text{param1} - 0.6220545447343789)) * \\
& 0.08986820991385858) - 0.2631614179526264))) * 0.08986820991385858) + (\text{param1} * \\
& (0.4129097454092311 * (\text{param1} * 0.08986820991385858)))) - (\text{param4} - (0.2631614179526264 - \\
& \text{param1}))) - (((\text{param2} - ((0.5260253009583357 + ((0.5260253009583357 - (\text{param2} - (\text{param5} - \\
& 0.4129097454092311)))) - (((0.08986820991385858 * (((((0.4129097454092311 * \\
& 0.4129097454092311) * \text{param4}) - 0.4129097454092311) - \text{param2}) - (0.4561230057401422 * \\
& ((0.5260253009583357 * \text{param5}) - \text{param5}))) - 0.6220545447343789)) * 0.08986820991385858) - \\
& 0.2631614179526264))) * 0.5260253009583357)) * 0.4129097454092311 - 0.32253075171639245))) - \\
& (\text{param1} - (\text{param5} * \text{param4})))))) - ((\text{param4} + \text{param5}) - (\text{param2} - \text{param4})) + \text{param4})) - \\
& (0.23903304738833864 * (0.4129097454092311 - \text{param1})) * (\text{param4} - (((\text{param2} * (\text{param3} * \\
& 0.08986820991385858)) - (\text{param5} * (\text{param4} ^ (\text{param1} + \text{param4})))) + (0.5260253009583357 * \\
& (((0.5260253009583357 * 0.4129097454092311) * (0.5260253009583357 * \text{param4})) * \\
& ((0.08986820991385858 + (0.5260253009583357 ^ 0.4561230057401422)) * ((0.4129097454092311 * \\
& (\text{param1} * 0.08986820991385858)) * 0.08986820991385858))) - (((\text{param1} * 0.08986820991385858) - \\
& (0.5260253009583357 * (((\text{param4} * (0.4561230057401422 - \text{param1})) + \text{param1}) - \text{param5}))) * (\text{param5} \\
& * \text{param5})))))) * 0.08986820991385858) - \text{param2}) + (0.5260253009583357 - \text{param5})) * \\
& ((0.5260253009583357 * (\text{param2} * (\text{param4} * (((0.23903304738833864 + 0.4129097454092311) - \\
& 0.5260253009583357) * (\text{param4} + 0.5260253009583357)))) - \text{param5}) - ((0.2631614179526264 - \\
& (\text{param5} * ((0.4129097454092311 * (((\text{param1} - \text{param4}) * (0.4129097454092311 * (((\text{param2} * \\
& (((\text{param5} - (0.5260253009583357 * \text{param5})) * ((0.4129097454092311 * ((\text{param5} * \\
& ((0.08986820991385858 + \text{param1}) - \text{param3})) - 0.4129097454092311)) - \text{param5})) * \\
& 0.08986820991385858)) * ((0.4129097454092311 + (\text{param1} - ((\text{param1} * (\text{param1} - \\
& (0.08986820991385858 - 0.055292444109111494))) - \text{param5}))) * \text{param2})) - \text{param5}) - \text{param5}))) + \\
& (\text{param4} - (((0.2631614179526264 ^ ((\text{param4} ^ 0.4561230057401422) - \text{param2})) * \\
& ((0.8507921806298667 - (0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 - \text{param4}))) * ((\text{param1} * \\
& \text{param1}) * \text{param2}))) * ((0.4129097454092311 * 0.08986820991385858) * (\text{param1} * ((\text{param1} - \\
& 0.6565744026171978) - (((\text{param4} ^ ((0.2631614179526264 * (0.4129097454092311 * \\
& (0.4129097454092311 - ((0.8507921806298667 - (0.4129097454092311 * (0.4129097454092311 - \\
& ((((((((((((\text{param5} * 0.08986820991385858) * 0.4561230057401422) - \text{param1}) + \text{param2}) * \\
& (0.2524467858467919 + \text{param1})) * (((0.4561230057401422 * 0.31098240088358553) * \\
& 0.5260253009583357) * (\text{param4} - \text{param5})) * ((0.23565331262003797 - (((((\text{param1} - \text{param5}) - \\
& \text{param5}) + \text{param1}) * (\text{param1} - 0.4129097454092311)) * (\text{param3} * 0.08986820991385858)) - \\
& (0.23903304738833864 * 0.4129097454092311))) - (\text{param4} * 0.3633839612056994))) * \\
& 0.36413271248664303)) * 0.4561230057401422) + 0.6772126634668096) * (0.5260253009583357 * \\
& (0.5260253009583357 - \text{param5}))) - \text{param1})))) * (\text{param1} - 0.5260253009583357)))) - (((((\text{param5} * \\
& (\text{param5} ^ 0.2884695269456382)) - (\text{param4} * 0.4129097454092311)) - ((\text{param5} - (\text{param5} * \\
& (0.5260253009583357 - 0.2631614179526264)))) - (0.5260253009583357 * \text{param4}))) - \\
& (((0.5260253009583357 - 0.23903304738833864) - 0.5260253009583357) * ((0.4129097454092311 * \\
& (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357)) * \text{param1}))) ^ \text{param1} - (\text{param4} ^ \text{param4})))) * \\
& (((\text{param2} - \text{param1}) - (\text{param4} ^ 0.4561230057401422)) * 0.4129097454092311 * \text{param5}))) - \\
& 0.5260253009583357) * \text{param5})))) - \text{param3}))) - (\text{param5} + 0.4129097454092311)))) - \\
& (0.5260253009583357 * (((((0.5260253009583357 - (0.5260253009583357 * ((0.23903304738833864 * \\
& (\text{param4} ^ \text{param5})) * (0.4129097454092311 - (((0.5260253009583357 + \text{param1}) - \text{param5}) - \\
& 0.2631614179526264)))))) + (\text{param4} - 0.4129097454092311)) * (\text{param1} * \text{param2})) - (\text{param1} * \\
& (\text{param5} + 0.4129097454092311))) + 0.08986820991385858)))) * ((0.4129097454092311 * \\
& 0.4129097454092311) * 0.08986820991385858)))) + ((((((((\text{param4} * ((\text{param5} - 0.5260253009583357) * \\
& (((0.2631614179526264 - \text{param5}) - \text{param2}) + (0.5260253009583357 - (\text{param1} - \\
& ((0.23903304738833864 * \text{param2}) ^ (0.08986820991385858 * \text{param4})))) * (0.4129097454092311 - \\
& (\text{param4} ^ 0.4561230057401422)))) * ((\text{param5} - \text{param5}) + (((\text{param2} * ((0.01417187884331117 + \\
& (\text{param2} * \text{param2})) - ((0.6565744026171978 - \text{param1}) * \text{param5}))) * \text{param5}) - (\text{param1} - \\
& 0.02246549004799392)))) + \text{param1}) - (\text{param2} * (((0.5260253009583357 - ((\text{param5} - \text{param5}) - \\
& 0.2631614179526264)) + \text{param4}) * (0.08986820991385858 ^ \text{param1})))) * (0.08986820991385858 - \\
& (\text{param1} - \text{param4}))) - \text{param5}) - \text{param1}))) + \text{param1})))) * 0.08986820991385858)))) * \text{param4} - \\
& (((\text{param4} ^ (0.5260253009583357 * (((0.2631614179526264 - (\text{param4} - \text{param3})) *
\end{aligned}$$


$$0.08986820991385858) - (\text{param5} * 0.2524467858467919)) + 0.4561230057401422))) + 0.4129097454092311) + (0.5260253009583357 - \text{param4})))) * \text{param5}) - 0.1770129560002397) + ((\text{param4} * ((\text{param5} - 0.5260253009583357) * (\text{param4} + 0.5260253009583357))) - 0.3633839612056994))) * 0.4561230057401422) * (0.4129097454092311 - 0.5260253009583357) - 0.5260253009583357) * (0.14061671983844615 + (((0.2631614179526264 - (0.4561230057401422 - \text{param1})) - (\text{param5} - \text{param1})) + 0.23903304738833864) ^ \text{param3})))) * \text{param1}) - \text{param4}) - \text{param5}) - \text{param1}) * \text{param3}) * \text{param4}))) - \text{param5}) - \text{param1}) + 0.4129097454092311))$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 84,4% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 39.

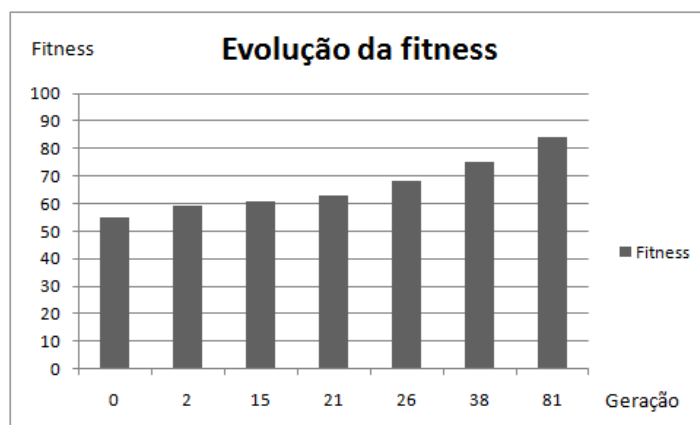


Figura 39: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3.

Utilizando base balanceada

O algoritmo do framework MINERA obteve resultados superiores aos obtidos pela Rede Neural para as classes 1 e 2 mas piores que os obtidos para a classe 3. Em comparação com os resultados obtidos pela Árvore de Decisão, os do framework foram superiores apenas para a classe 1. Os valores podem ser observados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21: Resultados obtidos para RNA e AD utilizando base de dados balanceada (Castanheira, pág. 83)

| Classes | Rede Neural | | | | Árvore de Decisão | | | |
|----------|--------------------------|-----------|-------------|--------|-----------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | | Erro (%) | | | |
| | Geração da Rede (Base 2) | | Diagnóstico | | Montagem da árvore (Base 2) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 |
| Classe 1 | 3,4 | 38,1 | 19,0 | 13,4 | 3,4 | 17,3 | 13,6 | 9,5 |
| Classe 2 | 5,2 | 39,7 | 7,2 | 43,5 | 6,9 | 7,1 | 3,8 | 33,5 |
| Classe 3 | 13,7 | 23,9 | 47,6 | 32,4 | 8,6 | 11,9 | 27,2 | 31,3 |



Tabela 22: Simulação 1 - Resultados do MINERA

| Classes | MINERA (Melhor Regra) | | | |
|----------|---------------------------|-----------|-------------|--------|
| | Erro (%) | | | |
| | Geração da Regra (Base 2) | | Diagnóstico | |
| | Treinamento | Validação | Base 1 | Base 3 |
| Classe 1 | 3,1 | 29,3 | 11,2 | 8,3 |
| Classe 2 | 4,2 | 6,9 | 5,3 | 29,4 |
| Classe 3 | 20,1 | 25,6 | 49,1 | 39,8 |

A melhor regra obtida para as classes 1, 2 e 3 é apresentada sob a forma de uma cláusula SQL que filtra os dados no banco de dados. Essa cláusula é apresentada da seguinte forma:

Regras encontradas

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 1:

WHERE

```
(param4 < (((0.2987494887109897 ^ ((0.6812322677794309 * (param4 ^ (((param3 * (param5 + 0.9911986782148782)) * (param2 ^ param3)) ^ param5))) ^ (((0.7410618288358719 * (param5 ^ (param2 ^ 0.897861173563832))) ^ (((param3 ^ param5) * (param4 ^ param3)) ^ param3) + (param5 + (0.4297327267840275 * ((param5 ^ param2) ^ (param2 ^ ((param1 ^ ((0.8415778784304521 ^ (((0.9911986782148782 ^ param2) ^ param4) + ((0.9911986782148782 ^ param3) ^ param5)) - (((0.6812322677794309 * (param4 ^ (((param3 * (param5 + param5)) * (param2 ^ param3)) ^ (param3 ^ (0.12469536517673818 * ((0.3852943654207116 - (0.13513567442250585 * param3)) ^ ((0.3604720512116215 ^ ((param1 * (((param1 ^ param2) ^ (param5 ^ 0.11816393342195419)) * 0.12469536517673818) ^ param3) ^ 0.810879568442525)) ^ ((param4 ^ (param1 ^ param4)) ^ ((param3 ^ ((param5 ^ param5) ^ (param2 ^ (param1 - (param1 - ((0.05742011092334376 ^ param5) * (param2 ^ param5)))))) + 0.9007049862834365)) * (param3 ^ (param5 ^ (((0.8251713024760082 - param4) ^ param4) * (((param4 + (0.7410618288358719 * (param5 + 0.10386444098315817))) ^ param2) * ((param1 - param1) ^ param3))) ^ ((param2 * (((param5 + param5) ^ param1) + 0.482877579106631)) ^ 0.11816393342195419)))))) ^ param1)))))) ^ ((param1 + (param5 * param2)) + ((0.17073344211478214 + param5) + 0.03135159535925536)) * param5)) - param5)) ^ (0.11816393342195419 * param1)) ^ param5)))) + param2) + (((param5 ^ ((param5 - (param1 + 0.9004810354383456) + (param2 ^ param5))) ^ (param1 ^ ((param1 - param5) ^ (((param1 - 0.17073344211478214) ^ (param2 ^ param5)) ^ (0.2662298252335099 + ((param3 ^ (((0.17073344211478214 * (((0.30517620696927283 + ((param2 + (0.5854239057274517 * 0.8739260068505852) + ((param3 ^ ((param4 + ((param2 ^ (param1 - (param1 - ((param3 ^ param5) * (param5 ^ param2) ^ param5)))) * param1)) - param4)) * 0.8136130892976663) ^ 0.574298150089041)) - (0.7410618288358719 ^ param2)) ^ (0.7410618288358719 ^ ((param4 ^ (param2 ^ (0.17073344211478214 * param1))) * param5) ^ (((param3 * (param5 * (((param2 ^ (0.7410618288358719 - ((param5 ^ ((param2 ^ ((param4 * param5) ^ param3) ^ ((param1 - param5) ^ (param3 * 0.30517620696927283)) ^ param5) * (param5 ^ param1)))) ^ param4)) * param5) * param1) ^ (param1 ^ param1)) * (((param4 ^ (((param1 * (param1 - 0.17073344211478214) - (param1 * (param2 * (param5 + param5)))) * (((((((param5 ^ ((param4 ^ ((param2 - 0.7882467534118293) + (param5 - 0.17073344211478214)) + ((0.17073344211478214 ^ 0.23479271811944513) * 0.7410618288358719) * param1))) ^ param2)) * (param2 ^ 0.7410618288358719)) ^ 0.17073344211478214) - (param2 * 0.2981749878643961)) ^ param4) * (param1 ^ (param5 ^ 0.19769823970120814))) ^ (((0.8415778784304521 + ((param2 ^ param4) - ((0.7016953769411594 ^ ((param2 ^ param1) ^ 0.7016953769411594)) ^ (param3 * param1))) * param2) * ((0.17073344211478214 ^ (param2 * param5)) * 0.7410618288358719)) ^ param3) * param2) ^ (((param3 * param5) * 0.44740991135257013) * (param1 * (param4 ^ param4)))) * ((0.6488143889947053 * param5) ^ (((0.9911986782148782 ^ param5) ^ (param3 + param1)) * param3))) * ((0.12469536517673818 ^ ((0.7410618288358719 ^ param5) + param5)) ^
```



$$\begin{aligned}
& (0.25221231423527934 \wedge ((0.9911986782148782 \wedge \text{param5}) \wedge (\text{param5} \wedge 0.810879568442525)))) * \\
& \text{param5} \wedge \text{param2}) \wedge (((\text{param4} \wedge \text{param1}) * \text{param5}) * \text{param1}) \wedge 0.11816393342195419) * \text{param2} \\
& \wedge 0.4820790862489047) \wedge 0.11816393342195419) + 0.11816393342195419 + \text{param5} \wedge \\
& 0.2981749878643961)) * (\text{param2} \wedge (0.8415778784304521 + \text{param5})) \wedge (\text{param2} \wedge \text{param1}) * \\
& \text{param5} \wedge \text{param5})))) \wedge 0.6365311310570175) \wedge (\text{param3} + (0.9007049862834365 + \\
& 0.7484515085831428)) \wedge ((\text{param5} * ((\text{param5} \wedge \text{param5}) \wedge (\text{param1} * \text{param3}))) \wedge ((\text{param2} * \\
& (((\text{param5} + \text{param5}) \wedge \text{param1}) + 0.482877579106631)) \wedge 0.11816393342195419)))) * \text{param5}))) * \\
& (\text{param2} \wedge ((\text{param4} + ((\text{param5} + \text{param4}) \wedge \text{param5})) \wedge (0.08409800292322112 * ((((((\text{param5} \wedge \\
& 0.8662767384189779) \wedge (((\text{param5} + ((\text{param1} - 0.17073344211478214) \wedge (\text{param3} * \\
& (0.2354426041588603 * (\text{param3} \wedge (((\text{param3} * 0.30356055372755253) + \text{param2}) \wedge (\text{param3} \wedge \\
& \text{param5})) * (((\text{param2} * \text{param1}) + ((\text{param4} * (((0.7548864260278476 - 0.3853790434316252) - \\
& 0.02785353148189673) \wedge \text{param3}) + (\text{param1} + \text{param2})) - (\text{param2} \wedge 0.17073344211478214))) \wedge \\
& (\text{param5} \wedge (((\text{param1} * ((\text{param5} \wedge 0.12469536517673818) + (\text{param1} \wedge (\text{param1} - (\text{param2} \wedge (\text{param2} \wedge \\
& (((\text{param5} * \text{param3}) * \text{param2}) \wedge ((\text{param2} * (\text{param2} \wedge 0.11816393342195419) + (((\text{param4} * \text{param1}) \\
& \wedge \text{param2}) \wedge 0.7410618288358719)))))))))) \wedge 0.953342604082845) + \text{param2})))) \wedge (\text{param1} \wedge \\
& \text{param1})))))) \wedge \text{param1} + 0.482877579106631) - (((\text{param5} * \text{param1}) * ((((((\text{param5} \wedge \\
& (0.7596727573853064 \wedge \text{param1})) \wedge \text{param4}) \wedge \text{param2}) + 0.482877579106631) - (\text{param4} \wedge \text{param1})) \wedge \\
& 0.7016953769411594) \wedge \text{param3})) \wedge \text{param1})) * ((\text{param3} \wedge \text{param5}) - 0.7016953769411594) \wedge \\
& (((\text{param3} \wedge 0.05742011092334376) - \text{param1}) \wedge (((\text{param4} + ((0.5557259828775708 + (\text{param5} * \\
& (\text{param2} * \text{param1}))) + (((0.23871584274077184 \wedge 0.23479271811944513) * 0.7410618288358719) * \\
& 0.17073344211478214))) \wedge \text{param1}) \wedge (\text{param2} \wedge (0.15586251011463503 \wedge ((\text{param1} - \text{param1}) * \\
& \text{param1})))))) + (\text{param5} \wedge \text{param1})) \wedge ((\text{param1} * (0.3811977017696163 \wedge \text{param5})) \wedge \\
& (((0.41383285480335197 + \text{param4}) + \text{param5}) \wedge (\text{param4} \wedge ((0.06938517963595525 + \\
& 0.6435484925521139) \wedge 0.44782240650906635))) \wedge (((0.7014808813879456 + \text{param5}) - \\
& 0.7016953769411594) \wedge \text{param1}) * (((\text{param5} \wedge \text{param5}) * (\text{param3} \wedge (((0.8415778784304521 + \\
& 0.8839476141193646) \wedge \text{param2}) \wedge (\text{param5} \wedge \text{param3})))) \wedge ((0.25221231423527934 \wedge \text{param4}) \wedge \\
& (0.3394603494343331 + \text{param2})))))) + 0.06679448437553592)))) \wedge (0.05742011092334376 \wedge \\
& \text{param3})))) + (((0.8517617749252214 * ((\text{param3} \wedge \text{param5}) - 0.7016953769411594) \wedge (\text{param2} * \\
& \text{param5})) \wedge \text{param5})) * ((\text{param3} + ((((\text{param2} \wedge \text{param4}) + \text{param1}) + \text{param1}) \wedge ((\text{param2} * \\
& 0.6061241617084326) * (0.015490076740909964 + \text{param3})))) \wedge \text{param1})) + ((0.17073344211478214 + \\
& \text{param5}) + (\text{param4} + \text{param4})))) + (\text{param1} \wedge \text{param1})) \wedge ((\text{param2} \wedge \text{param3}) - \text{param3}))
\end{aligned}$$

Utilizando os dados de treinamento, essa regra classificou corretamente 96,9% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 40. Podemos perceber que a melhor regra foi obtida na geração de número 89, ou seja, com 89 iterações a melhor regra foi descoberta.

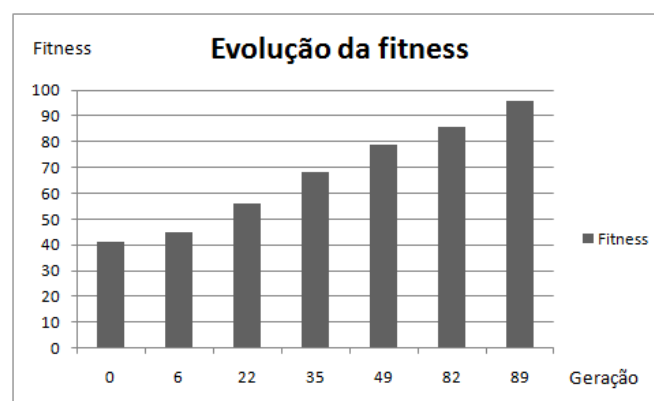


Figura 40: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 1.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 2:



Laboratório de Computação Evolucionária
 Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
 Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
 Fone: (31) 3409 34 26
 Contato: joao@cpdee.ufmg.br

WHERE

$$\begin{aligned}
 & ((\text{param5} * ((\text{param2} + (0.40244933106036374 + 0.40244933106036374)) - ((\text{param2} - \text{param3}) * \\
 & ((\text{param5} * (((\text{param2} + \text{param3}) * \text{param5}) * ((\text{param5} + (((\text{param5} * \text{param4}) * \text{param3}) - ((\text{param2} + \\
 & 0.40244933106036374) * (\text{param4} + ((\text{param5} * (\text{param5} * \text{param4})) - (\text{param1} + (((\text{param5} + ((\text{param2} + \\
 & (\text{param3} * ((\text{param3} + 0.04449168387011748) * (\text{param5} * (((\text{param5} - \text{param1}) * \\
 & 0.40244933106036374) + (((\text{param3} - ((\text{param5} * ((\text{param4} + \text{param5}) ^ (((\text{param3} * (\text{param1} + \\
 & \text{param4})) + ((\text{param3} + \text{param5}) - (\text{param3} * \text{param5})))) * (\text{param5} * 0.40244933106036374)))) - \text{param4})) \\
 & - (((0.1866298496642056 * 0.15638402121228123) ^ \text{param5}) + \text{param5})) + (\text{param5} + \text{param2})) * \\
 & (\text{param2} * \text{param4})) + (0.40244933106036374 * \text{param3})))) * ((\text{param3} + (\text{param3} * \text{param3})) * \\
 & 0.005115105324142721))) + (((\text{param2} + ((0.04449168387011748 - ((0.40244933106036374 + (\text{param4} \\
 & - \text{param3})) * (((\text{param5} + \text{param3}) - \text{param4}) * \text{param1}) * ((\text{param4} - ((\text{param3} * ((\text{param5} ^ \\
 & (0.07920081606313234 + (\text{param3} - \text{param5}))) + (((\text{param4} + (\text{param5} - \text{param4})) - ((\text{param1} ^ \\
 & 0.8337712280675077) + 0.8837590537315694)) + ((\text{param2} * ((0.6153170440534108 + (\text{param4} + \\
 & 0.8811776127055884)) - (((\text{param3} + (\text{param5} - (\text{param5} + \text{param5}))) * 0.40244933106036374) + \\
 & 0.40244933106036374))) + ((\text{param4} + \text{param1}) - \text{param5})))) + (\text{param4} + (((\text{param1} ^ \\
 & 0.8337712280675077) + 0.8837590537315694) + (\text{param3} * (\text{param4} * (\text{param1} + \\
 & 0.40244933106036374)))))) * ((\text{param4} + ((\text{param3} * ((0.40244933106036374 + \text{param5}) * \text{param5})) + \\
 & (((\text{param2} + (0.04449168387011748 + ((0.17338880169539617 + (((\text{param4} ^ \text{param5}) + ((\text{param5} * \\
 & \text{param2}) * \text{param5})) * (\text{param5} + (((\text{param2} + (\text{param4} * ((0.37495357979387967 * \\
 & ((0.24492262511808283 * (((((0.920617119223012 + \text{param4}) + (\text{param3} + \text{param4})) + \text{param3}) * \\
 & 0.431123363197918) * (((((\text{param3} ^ \text{param4}) * (\text{param3} - \text{param3})) ^ 0.5002481773070805) - (\text{param5} \\
 & + \text{param3})) + (\text{param4} + (\text{param3} - 0.005115105324142721)))) * (0.8188858541592304 + \\
 & 0.1866298496642056))) + \text{param4}) - ((0.5485394518787244 * (\text{param3} - (0.8660248206936347 - \\
 & \text{param4})) * \text{param2})) * (\text{param4} * 0.9575552805842298)) * ((0.40244933106036374 * \\
 & 0.920617119223012) * ((\text{param5} + ((0.40244933106036374 * \text{param5}) + ((\text{param3} + (\text{param5} + \text{param3})) \\
 & + (((\text{param3} + \text{param5}) * (\text{param4} + \text{param1})) - \text{param5}) * \text{param4})))) + (\text{param5} * \\
 & (0.8188858541592304 + (((((((\text{param4} * (((\text{param4} - (0.18942881453786076 * \\
 & (((((0.39046423879488834 * (\text{param5} ^ ((0.9858569807465347 + 0.40244933106036374) * (((\text{param5} + \\
 & ((\text{param5} + 0.07920081606313234) + 0.1866298496642056)) * (0.40244933106036374 + \text{param5})) + \\
 & ((\text{param5} * 0.16632305941118697) + 0.9996851726031258)) * (\text{param3} * ((\text{param5} * (\text{param2} + \\
 & \text{param4})) + (((\text{param4} + \text{param5}) + \text{param5}) - \text{param5}) - (\text{param4} + (((\text{param5} * 0.9575552805842298) + \\
 & (\text{param4} - \text{param3})) * ((\text{param2} + \text{param5}) + (\text{param5} + (\text{param1} * (((\text{param4} * ((\text{param3} - ((\text{param3} + \\
 & \text{param2}) * 0.005115105324142721)) + (((((((\text{param4} - (\text{param5} * \text{param2})) * \text{param3}) * \\
 & (0.6435461888856709 * (0.37495357979387967 * \text{param5}))) + 0.40244933106036374) * \\
 & (0.40244933106036374 - ((\text{param5} + \text{param5}) - \text{param3}))) - 0.016267422089418004))) + ((\text{param4} * \\
 & (((\text{param2} * ((\text{param4} * (((\text{param5} ^ \text{param4}) - (\text{param3} + 0.04449168387011748)) + \text{param5})) * \\
 & \text{param5})) + \text{param3}) - (((\text{param3} * (\text{param1} + \text{param4})) + ((\text{param5} * 0.31434952975954344) * \text{param2})) \\
 & * (\text{param5} * 0.40244933106036374))) * (\text{param4} + (0.40244933106036374 + ((\text{param5} * \text{param4}) - \\
 & ((\text{param4} * (\text{param5} + \text{param4})) * (\text{param5} + 0.24795054611728407)))))) + (\text{param1} * (\text{param4} + \\
 & \text{param5}))) * \text{param4}) - 0.40244933106036374)))))) + \text{param3}) - \text{param4}) ^ ((\text{param4} + \text{param2}) * \\
 & 0.40244933106036374) + (\text{param4} + \text{param1}))) * (\text{param2} + \text{param5}) + (\text{param2} + \text{param4})) + \\
 & (((\text{param3} + (((0.40244933106036374 + \text{param4}) * \text{param4}) + 0.04449168387011748)) * ((\text{param4} + \\
 & (0.40244933106036374 + 0.40244933106036374)) ^ 0.696918516792836)) * (((0.40244933106036374 * \\
 & (\text{param5} + (((\text{param5} + \text{param4}) ^ (\text{param1} + \text{param4})) + \text{param5}) + 0.04449168387011748))) + \\
 & (0.5999081045961903 - \text{param4})) + ((\text{param5} - ((\text{param2} + ((\text{param1} * \text{param3}) * \text{param5})) * (\text{param4} * \\
 & \text{param5}))) * (\text{param5} + ((\text{param5} + (((\text{param4} * (((((((\text{param3} * (\text{param4} + \text{param4})) + \\
 & 0.20707278959685937) * ((\text{param2} + \text{param3}) + \text{param5})) * \text{param5})) * ((\text{param5} * \text{param2}) + \text{param4})) * \\
 & \text{param5}) * \text{param3})) + ((\text{param4} + \text{param5}) + (\text{param5} + \text{param5}))) * (((((\text{param5} * \text{param4}) * (\text{param4} * \\
 & 0.44959395221007203)) + \text{param4}) * \text{param5}) + (\text{param4} - ((\text{param5} + (((\text{param5} * \text{param1}) - \text{param5}) * \\
 & \text{param1}) + (0.1866298496642056 + 0.04449168387011748)) * \text{param5})))) + \text{param4})))) - \text{param5}) * \\
 & 0.9476100049621744) * ((\text{param3} + 0.7728972108122985) * \text{param4})) + \text{param3}) - (\text{param4} * \\
 & (((0.40244933106036374 * (((\text{param4} * 0.01713366098379432) + 0.431123363197918) * \text{param2})) + \\
 & (0.40244933106036374 - 0.5644227175202998) + \text{param5}))) * \text{param4})))))) * (\text{param4} + \text{param1}) * \\
 & (\text{param2} * \text{param5}))) + \text{param5}) * (\text{param2} - (((\text{param2} + (\text{param3} - 0.005115105324142721)) + \text{param4}))
 \end{aligned}$$


$$\begin{aligned}
& + (\text{param5} * ((0.40244933106036374 * 0.1866298496642056) * (\text{param4} * (\text{param4} * (\text{param5} * \\
& (\text{param4} + \text{param5})))))) + 0.5303796440454129))) + 0.6042283847358279) + \text{param2})) + \text{param5}))) + \\
& (((((\text{param4} * (\text{param4} * (((\text{param5} + (((0.04449168387011748 - \text{param4}) + (\text{param5} + (\text{param5} * \\
& (\text{param5} * 0.40244933106036374)))) * (\text{param3} - (\text{param5} - ((0.047991975424432565 - \text{param4}) - \\
& \text{param5})))) * 0.40244933106036374 * \text{param5})) + (\text{param1} * (\text{param4} + (\text{param4} - \text{param3}))) - \\
& \text{param5} * ((\text{param3} + 0.777880417706782) * ((0.16045982996428865 + \text{param2}) * (((\text{param5} * \\
& 0.40244933106036374) + (((\text{param5} ^ \text{param3}) - (\text{param4} * \text{param3})) * (\text{param2} * \text{param4}))) + \\
& 0.8085093882229948)))) + (\text{param5} + (\text{param5} + (0.9476100049621744 * \text{param3})))) * (\text{param4} + \\
& \text{param4})) * \text{param4} + 0.7938001764139319) + (\text{param4} + ((0.40244933106036374 + ((\text{param5} + \\
& (((\text{param4} - \text{param4}) + (\text{param5} + \text{param2})) - (\text{param3} - \text{param5})) * (((\text{param2} * \text{param4}) + (\text{param3} + \\
& 0.777880417706782)) * 0.1866298496642056))) * (\text{param4} - \text{param5})))))) * \text{param4})) * ((\text{param5} - \\
& \text{param5} * \text{param4}))) - \text{param5}))) >= ((\text{param4} + (\text{param1} * (\text{param3} - ((\text{param3} + \text{param3}) * \\
& 0.005115105324142721)))) - \text{param5}))
\end{aligned}$$

Esta regra, quando aplicada aos dados de treinamento, classificou corretamente 95,8% dos dados.

Regra encontrada para classificar registros pertencentes à CLASSE 3:

WHERE

$$\begin{aligned}
& ((0.016313032758366708 + \text{param1}) >= ((0.12792423065535774 * 0.15928123985637033) - \\
& (((0.3291248143294717 - \text{param5}) - \text{param5}) - \text{param1}) ^ ((\text{param1} - (((\text{param4} - ((\text{param2} - \text{param4}) * \\
& \text{param4})) - (((\text{param1} - (((0.3291248143294717 * ((\text{param1} + (0.6059580577146372 * \\
& 0.22391802620262002) - (\text{param2} - \text{param1}))) - (\text{param2} - \text{param1})) - \text{param2})) - \text{param5}) * \text{param1} - \\
& (((((\text{param2} * (\text{param1} - (((\text{param5} ^ 0.6075695701361395) + \text{param4}) * (\text{param1} - (\text{param2} - \\
& (((0.8925066796940203 - \text{param5}) - (\text{param1} * (((\text{param4} - (((\text{param1} - \text{param1}) + (\text{param1} - (\text{param2} - \\
& (\text{param5} - \text{param2})))) * 0.4367993453115797)) - \text{param1}) ^ (((\text{param1} - \text{param3}) * \\
& 0.20262626923964044) - (0.3291248143294717 - (\text{param2} - (\text{param2} * \text{param1})))))) * \\
& (0.2155656276486202 - ((\text{param4} - \text{param1}) - (\text{param2} - (((\text{param3} - (\text{param4} * \text{param5})) - \text{param1}) - \\
& (\text{param1} + (((\text{param2} - ((0.5066110953256353 - ((\text{param1} - 0.22391802620262002) * (\text{param2} ^ \\
& (0.20262626923964044 + \text{param1})))) * \text{param3})) - \text{param2}) - ((\text{param1} - \text{param3}) * (\text{param1} - (\text{param1} ^ \\
& \text{param1})))))) + (\text{param2} * 0.7907642305471858)))))) - (((0.3291248143294717 - \text{param5}) - \text{param5}) - \\
& \text{param1}) ^ (\text{param1} + \text{param1})) - (\text{param1} * (((\text{param1} ^ (\text{param1} - ((\text{param2} - \text{param1}) - \text{param1}))) - \\
& (\text{param3} - (((\text{param3} - \text{param4}) * \text{param3}) - 0.6986043440240197))) - \text{param5}) - (((0.3291248143294717 \\
& * (\text{param4} - \text{param5}) + (0.22391802620262002 * \text{param5}) + \text{param4}) - (0.31512833074401314 * \\
& (((((0.09474280901369869 - \text{param4}) + \text{param4}) * (\text{param4} - \text{param1})) + \text{param4}) + \\
& (0.48196365295732124 - (((0.0866431764805824 ^ ((\text{param1} - \text{param4}) - (\text{param1} - \text{param3}))) - (\text{param2} \\
& - ((\text{param1} * 0.023951454191022292) + \text{param4}))) - \text{param2})))))) + \text{param1}) - \text{param1})) * \\
& 0.793583873527238)) * (\text{param5} - (\text{param2} - (\text{param1} - (\text{param5} - (0.09474280901369869 + \\
& \text{param5}))))))
\end{aligned}$$

Durante o processo de treinamento, esta regra classificou corretamente 79,6% dos dados. A evolução da fitness é apresentada na Figura 41.



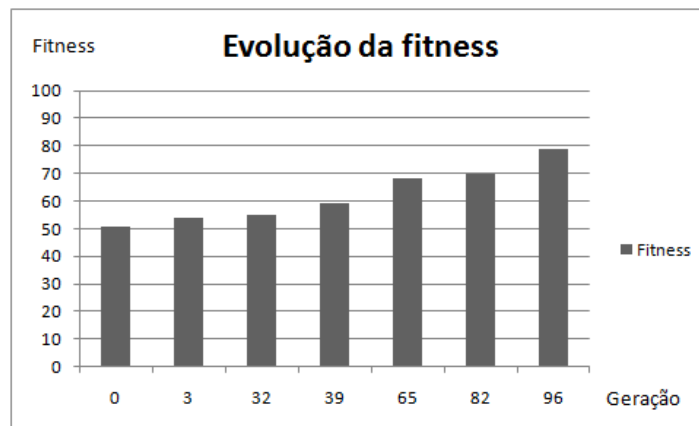


Figura 41: Evolução da fitness ao longo das gerações para classe 3.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a aplicação do framework MINERA aos dados de cromatografia obtidos a partir de diferentes bases de dados, as quais foram divididas em grupos para fins de treinamento e validação do algoritmo. Foram utilizadas outras ferramentas de detecção de padrões com a finalidade de realizar comparações referentes ao desempenho na descoberta de regras nas bases de dados.

Os resultados apresentam informações interessantes, com taxas de acerto alcançando elevados valores em algumas classes, indicando um caminho promissor a ser explorado. Vale ressaltar que existe um fator de incerteza nos próprios dados de validação, pois o diagnóstico foi atribuído por um especialista e não por inspeção do equipamento.

As taxas de acerto no treinamento foram semelhantes às taxas obtidas utilizando os dados de validação. Isto mostra que não houve overfitting muito elevado.



5. Considerações Finais

5.1 Conclusões

O algoritmo implementado no framework MINERA, derivado da Programação Genética, apresenta algumas características bastante interessantes, tanto do ponto de vista de arquitetura do software quanto na sua habilidade para descobrir regras escondidas em base de dados.

Enquanto em outras abordagens de Programação Genética a estrutura de um indivíduo é representada em Árvore Binária e aceita diversas classes como Nó Folha, na estrutura adotada, um indivíduo é uma regra para uma classe específica, ou seja, é como se um indivíduo fosse um especialista que aprofunda seus conhecimentos em um determinado assunto e não um conhecedor superficial de diversos assuntos. Outro ponto interessante é a flexibilidade do framework, que permite que qualquer função seja adicionada na árvore sem prejuízo na hierarquia de processamento do algoritmo.

O framework MINERA, apesar de ter sido testado acessando SGBD MySQL, é independente de plataforma de Banco de Dados e Sistema Operacional. Sua característica de ser embutido em sistemas acessíveis a partir de qualquer lugar do mundo por meio da Web também mostra um diferencial em relação às demais ferramentas.

O suporte a multi-core também é outra vantagem que deve ser levada em consideração, visto que os computadores atuais são equipados com processadores com diversos núcleos e a preços acessíveis. Logo, se os programas são construídos com suporte a múltiplos núcleos, eles podem tirar máximo proveito dessas máquinas.

A robustez e estabilidade do algoritmo estão amparadas tanto pela arquitetura do framework quanto pelos resultados obtidos com baixo overfitting. A arquitetura implementada permite que qualquer modelagem de problema de descoberta de conhecimento em base de dados seja suportada pelo framework. Para isso, basta que sejam codificadas classes específicas nas áreas “hot spots”, como descrito na seção 3.2.

Antes de utilizar o algoritmo para inferir sobre o estado dos transformadores, é necessária uma pré-análise para saber como os dados se comportam. Esta análise foi realizada utilizando a correlação dos atributos com os resultados, permitindo, no caso dos dados de cromatografia, o uso de algumas razões entre concentrações de gases na tentativa de aumentar a correlação entre eles.

Um grande problema enfrentado nessa área de descoberta de regras utilizando base de dados de cromatografia de transformadores de potência é a escassez de dados com diagnósticos comprovados, bem como a ausência de padrões de diagnósticos. Na própria literatura não há padrão seguido, dessa forma, a descrição dos diagnósticos são digitados por especialistas ocasionando várias denominações para o mesmo problema.

A ferramenta computacional implementada mostrou se tão robusta quanto aquelas baseadas em RNAs e Árvores de decisão, embora se acredite que esta pesquisa deve ser aprofundada para explorar ao máximo o potencial da Programação Genética.

5.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Como propostas para trabalhos futuros, seria interessante implementar um framework contendo um comitê de decisão, o qual seria constituído por diversas ferramentas diferentes, como Programação Genética, Árvore de Decisão e Redes Neurais, uma vez que se observou que entre estas não há uma que se sobrepõe às demais. Os resultados apresentados nesta dissertação mostraram que ora os resultados do framework Minera eram superiores, ora eram os da Árvore de Decisão e/ou aqueles oriundos das Redes Neurais.



Outro ponto a ser destacado como proposta é a análise realizada em dados de transformadores agrupados por fabricante e por classe de tensão.



Laboratório de Computação Evolucionária
Departamento de Engenharia Elétrica – UFMG
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – CEP 31.270-010
Fone: (31) 3409 34 26
Contato: joao@cpdee.ufmg.br

6. Referências Bibliográficas

- [1] **M. B. Hell.** Sistemas de Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência Utilizando Análise de Gases Dissolvidos e Técnicas de Inteligência Computacional. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2002.
- [2] **Z. Wang, Y. Liu, and P. J. Griffin.** Neural Net and Expert System Diagnose Transformer Faults. IEEE Computer Applications in Power, 2000, Vol. 13, No. 1, p. 50-55.
- [3] Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57. 104-1991, 1991.
- [4] **V. H. Howe, L. Massey and A. M. Wilson.** Identity and significance of gases collected in Buchholz protectors, 1956, IM. V. Gazette.
- [5] **W. D. Halstead.** A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers. Journal of the Institute of Petroleum, 1973, Vol. 59, No. 569, p. 239-41.
- [6] **B. Fallou, F. Viale, I. Davies, R. Rorgers, E. Dörnenburg.** Application of physico-chemical methods of analysis to the study of deterioration in the insulation of electrical apparatus. CIGRE Report 15-07, 1970.
- [7] **E. Dörnenburg, W. Strittmatter.** Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis. Brown Boveri Review, 1974, v.5, n.61, p.238-247.
- [8] **R. R. Rogers.** UK Experience in the interpretation of incipient faults in power transformers by dissolved gas-in-oil chromatographic analysis. Doble Client Conference, 1975, Paper 42 AIC 75.
- [9] **R. R. Rogers.** IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas-in-oil analysis. IEEE Transaction on Electric Insulation, 1978, v.El-13, n.5, p.348-54.
- [10] **B. D. Sparling.** Transformer Monitoring Moving Forward from Monitoring to Diagnostics. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, 2001, vol. 2, p. 960-963.
- [11] **J. J. Durkam.** Transformer Oil Diagnosis Using Fuzzy Logic and Neural Networks. Conference in Electrical and Computer Engineering, Canadian, 1993, Vol. 1, p. 329-332.
- [12] **D. B. Fogel.** An introduction to simulated evolutionary optimization. IEEE Transaction on Neural Networks, 1994, v.1, n.5, p.3-14.
- [13] **Y. C. Huang, H. T. Yang, C. L. Huang.** Developing a new transformer fault diagnosis system through evolutionary fuzzy logic. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, v.12, n.2, p.761-67.
- [14] **J. A. Vasconcelos, J. A. Ramirez, R. H. C. Takahashi, and R. R. Saldanha.** Improvements in genetic algorithms, IEEE Trans. Magn., vol.37, pp. 3566–3569, Sept. 2001.
- [15] **H. L. Sepúlveda .** O Transformador e sua Influência nas Características de Funcionamento de um Sistema Elétrico de Potência: Uma experiência profissional. Escola de Engenharia UFMG, 1981.
- [16] **J. C. de Oliveira, J. R. Cogo, J. P. G. de Abreu.** Transformadores: teoria e ensaios. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
- [17] **V. Vasconcelos, M. E. G. ALVES, G. A. MOURA.** Especificação de Sistemas de Monitoramento On-line para Transformadores de Potência Baseada em Arquitetura Descentralizada. CLADE, 2008.
- [18] **IEEE Std C57.106.** Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. American National Standard, 1977.
- [19] **Y. Shang, L. Yang, Z. J. Guo, Z. Yan.** Assessing aging of large transformer by furfural investigation, 7th international Conference on Solid Dielectrics, pp.272-274, Eindhoven, the Netherlands, 2001.
- [20] **E. Mori, H. Tsukioka, K. Takamoto, N. Miyamoto, T. Kobayashi, H. Okubo.** Latest Diagnostic Methods of Gas-in-oil Analysis for Oil-filled transformer in Japan. Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids, Nara, Japan, 1999.
- [21] **M. H. Wang.** Extension neural network for power transformer incipient fault diagnosis. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 150, Num. 06, 2003.
- [22] **J. J. Kelly.** Transformer fault diagnosis by dissolved-gas analysis. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-16, nº 6, p. 777-782.



- [23] **J. Eggermont.** Data Mining using Genetic Programming - Classification and Symbolic Regression. Institute for Programming research and Algorithmics. 2005.
- [24] **T. Segaran.** Programming Collective Intelligence – Building Smart Web 2.0 Applications. O’Reilly Media, 2007.
- [25] **I. Benyahia, J. Potvin.** Decision support for Vehicle Dispatching Using Genetic Programming. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 28, N. 03, 1998.
- [26] **L. J. Fogel , A. J. Owens, and M. J. Walsh.** Artificial Intelligence Through Simulated Evolution. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
- [27] **J. H. Holland.** Adaptation in natural artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [28] **J. R. Koza.** Genetic Programming as a Means for Programming Computers by Natural Selection. Statistics and Computing. Springer Netherlands, 1994.
- [29] **J. R. Koza.** Genetic Programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems. Stanford University. Computer Science Department. Stanford, 1990.
- [30] **A. L. Júnior.** Manutenção pré-corretiva em transformadores de potência – um novo conceito de manutenção. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- [31] **T. C. B. N. Assunção.** Contribuição à modelagem e análise do envelhecimento de transformadores de potência. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [32] **D. R. Morais.** Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [33] **T. O. Rouse.** Mineral Insulating oil in transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 14, pp. 6-16, 1998.
- [34] **R. Zirbes, J. G. Rolim, H. H. Zürn.** Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral. Revista Controle e Automação, Vol. 16, num. 3, 2005.
- [35] **L. A. Heredia.** Caracterização, manutenção e monitoramento on-line de buchas condensivas para transformadores de potência. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- [36] **A. C. Gjaerde.** Multi factor ageing models – origin and similarities. IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 13, num. 1, pp 199-204, 1997.
- [37] **B. Pahlavanpour, A. Wilson.** Analysis of transformer oil for transformer condition monitoring. In An Engineering Review of Liquid Insulation (Digest N. 1997/003), IEEE Colloquium on, number 1/1-1/5, 1997.
- [38] **M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava.** Review of condition assessment of power transformers in service. IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 18, número 6, Nov.-Dez. 2002 Pag.12 – 25.
- [39] **P. M. Cardoso.** Adaptação de um sistema de medição de gases dissolvidos em óleo mineral isolante para monitoração de múltiplos transformadores de potência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Setembro, 2005.
- [40] **A. C. T. Diogo.** “Avaliação da vida útil de transformadores de potência através da cromatografia líquida de alto desempenho”, Anais do XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1997. Grupo XIII – Equipamentos Elétricos e Materiais de Subestações (GEM).
- [41] **L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter.** “Aging of oil-impregnated paper in power transformers”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, Janeiro de 2004.
- [42] **J. Unsworth, F. Mitchell.** “Degradation of electrical insulating paper monitored using high performance liquid chromatography”, in Properties and Applications of Dielectric Materials, 1988, Proceedings, Second International Conference on Properties and Applications, 1988.
- [43] **V. Sokolov, V. Bulganova, Z. Berier.** “Assessment of power transformer insulation condition”. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. 2001.
- [44] **V. Sokolov, Z. Berier, V. Rashkes.** “Effective methods of assessment of insulation system conditions in power transformers: a view based on practical experience”. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. 1999.



- [45] **M. Duval, A. dePablo.** Interpretation of Gas-in-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 17, 2001.
- [46] **M. Duval.** A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002.
- [47] **P. Tan, M. Steinbach, V. Kumar.** "Introduction to Data Mining", Addison Wesley, 2006.
- [48] **J. Han, M. Kamber.** "Data Mining: Concepts and Techniques". The Morgan Kaufmann Series in Date Management Systems. Second Edition. 2006.
- [49] **R. Cattral, F. Oppacher, D. Deugo.** Supervised and Unsupervised Data Mining with an Evolutionary Algorithms. IEEE, 2001.
- [50] **S. L. Elkaffas, A. A. Toony.** Applications of Genetic Programming in Data Mining. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 17. 2006.
- [51] **S. Bhattacharyya.** Direct marketing performance modeling using genetic algorithms, Journal on Computing 11 (1999) (3), pp. 248–257.
- [52] **P. S. Ngan, M. L. Wong, W. Lam, K. S. Leung, J. C.Y. Cheng.** Medical data mining using evolutionary computation. Artificial Intelligence in Medicine 16 (1999), pp. 73–96.
- [53] **Z. Zang, W. Huang, D. Xiao, Y. Liu.** Fault Detection of Power Transformers Using Genetic Programming Method. Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai (2004), pp. 26-29.
- [54] **W. Pree.** Meta patterns - a means for capturing the essentials of reusable object-oriented design. in M. Tokoro and R. Pareschi (eds), Springer-Verlag, proceedings of the ECOOP, Bologna, Italy: 1994.
- [55] **L. G. Castanheira.** Aplicação de Técnicas de Mineração de Dados em Problemas de Classificação de Padrões. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UFMG, 2008.
- [56] **V.V. Zhirnov, R.K.Cavin, J.A. Hutchby, G.I. Bourianoff.** Limits to binary logic switch scaling - a gedanken model. Proceedings of the IEEE. Vo. 91, 2003.
- [57] **M. Duval.** Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer. IEEE Electrical Insulation Magazine. November/December 1989. Vol. 5, Núm. 6.
- [58] **M. A. Pereira, J. A. Vasconcelos.** A Niche Genetic Algorithm for Classification Rules Discovery in Real Databases. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. 2010.
- [59] **J. Nunes, B. Pahlavanpour.** Os Recentes Desenvolvimentos na Análise de Gases Dissolvidos (DGA). XIII Eriac. Argentina, Maio de 2009.
- [60] **J. G. Brookshear.** Ciência da Computação: Uma Visão Abrangente. Bookman, 7ª Ed. 2003.
- [61] **R. Linden.** Algoritmos Genéticos: Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional. Brasport, 2ª Ed. 2008.
- [62] **L. C. Z. Júnior.** Transitórios Eletromagnéticos em Sistema de Potência. Edusp, 1ª Ed. 2003.
- [63] **M. Leite.** Técnicas de Programação: Uma Abordagem Moderna. Brasport, 1ª Ed. 2006.
- [64] **E. Monteiro, E. Lucas, L. Soares.** Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. E-Papers Editoriais, 1ª Ed. 2001.
- [65] **S. O. Rezende (Organizadora).** Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações. Editora Manole Ltda, 1ª Ed. 2003. Barueri, SP.
- [66] **S. Sivanagaraju, S. Satyanarayana.** Electric Power Transmission and Distribution. Pearson Education in South Asia: India, 1ª Ed. 2009.
- [67] **W. M. Cuenca, J. M. Seixas, A. F. Levy.** Análise de Componentes Principais para Identificar Descargas Parciais em Transformadores de Potência. Anais do Simpósio Brasileiro de Redes Neurais. Rio de Janeiro, Novembro de 2000.
- [68] **E. Gamma, R. Johnson, J. Vlissides, R. Helm.** Padrões de Projeto. Editora Bookman, 1ª Ed: 2000.
- [69] **J. Robredo.** Da Ciência da Informação Revisada aos Sistemas Humanos de Informação. Editora: Thesaurus: 2003.



- [70] **M. Casters, R. Bouman, J. V. Dongen.** Pentaho Kettle Solutions: Building Open Source ETL Solutions with Pentaho Data Integration. Wiley: 2010.
- [71] **P. G. L. Sivini.** Desenvolvimento de Banco de Dados de Confiabilidade: Uma Aplicação em Estações Redutoras de Pressão de Gás Natural. Dissertação submetida à UFPE para obtenção do grau de Mestre. Recife, Junho, 2006.
- [72] **J. Dong.** Network dictionary. Saratoga CA : Javvin Technologies, Inc. 2007.
- [73] **D. Flanagan.** Java in a Nutshell. O'Reilly Media Inc: 5ª Ed, 2005.
- [74] **R. A. Sarker, H. A. Abbass, C. Newton .** Heuristic & Optimization for Knowledge Discovery. Hershey, PA: Idea Group Publishing, 2002.
- [75] **W. Sun, Y. Yuan.** Optimization Theory and Methods – Nonlinear Programming. Springer, 2006.
- [76] **A. Opper, R. Sheldon.** SQL: a beginner's guide. McGraw-Hill: 3ª Ed, 2009.

