

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO**

**NICOLAS KEMERICH DE MOURA**

**Otimização Computacional da Avaliação de Resultados de  
Ensaio Físico-químicos em Transformadores de Potência**

Goiânia  
2018

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:     Dissertação     Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

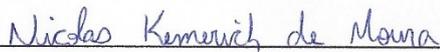
Nome completo do autor: Nicolas Kemerich de Moura

Título do trabalho: Otimização Computacional da Avaliação de Resultados de Ensaio Físico-químicos em Transformadores de Potência

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 16 / 08 / 2018

---

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO**

**NICOLAS KEMERICH DE MOURA**

**Otimização Computacional da Avaliação de Resultados de  
Ensaio Físico-químicos em Transformadores de Potência**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Orientador: Prof. Leonardo da Cunha Brito, Dr.

Goiânia  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Kemerich de Moura, Nicolas

Otimização Computacional da Avaliação de Resultados de Ensaios Físico-químicos em Transformadores de Potência [manuscrito] / Nicolas Kemerich de Moura. - 2018.

xcviii, 98 f.: il.

Orientador: Prof. Leonardo da Cunha Brito.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2018.

Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. avaliação. 2. ensaios físico-químicos. 3. óleo isolante. 4. otimização. 5. transformadores de potência. I. da Cunha Brito, Leonardo, orient. II. Título.

CDU 621.3



## Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **NICOLAS KEMERICH DE MOURA**, realizada em 16 de agosto de 2018.

Aos dezesseis dias do mês de agosto de dois mil e dezoito, às 14:00 horas, na sala Caryocar Brasiliensis nas dependências da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG), Telma Woerle de Lima Soares - INF/UFG e Cacilda de Jesus Ribeiro - EMC/UFG para julgar a Dissertação de Mestrado de **NICOLAS KEMERICH DE MOURA** intitulada “OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL DA AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA” apresentada pelo candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Leonardo da Cunha Brito, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Profa. Dra. Telma Woerle de Lima Soares - INF/UFG e Profa. Dra. Cacilda de Jesus Ribeiro - EMC/UFG. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **aprovado** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 16 de agosto de 2018.

### Comissão Examinadora designada:

Leonardo da Cunha Brito  
Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: Aprovado)

Telma Woerle de Lima Soares  
Profa. Dra. Telma Woerle de Lima Soares - INF/UFG (Avaliação: Aprovado)

Cacilda de Jesus Ribeiro  
Profa. Dra. Cacilda de Jesus Ribeiro - EMC/UFG (Avaliação: Aprovado)

Prof. Dr. André Pereira Marques, instituição - IFG (Avaliação: \_\_\_\_\_)

Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula - EMC/UFG (Avaliação: \_\_\_\_\_)

Candidato

Nicolas Kemerich de Moura  
NICOLAS KEMERICH DE MOURA

*Ao meu Professor,  
Dr. Antônio César Baleeiro Alves,  
pelo apoio e pelos conselhos recebidos  
durante minha formação acadêmica.*

# Agradecimentos

Ao Professor Dr. Leonardo da Cunha Brito, pela orientação nas atividades desenvolvidas neste trabalho.

À Professora Dra. Cacilda de Jesus Ribeiro, pela apresentação de observações importantes em seus comentários.

Ao Eng. Dr. André Pereira Marques, por compartilhar conhecimento técnico e científico na área de Engenharia Elétrica.

À equipe do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D 321), pelas oportunidades de aprendizado.

Ao Departamento de Engenharia e Controle de Manutenção, UAT-DPEM, da Enel Distribuição Goiás, por propiciar o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Goiás, pelo ensino de qualidade.

À Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE) e à Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”*

*Nikola Tesla*

## Resumo

MOURA, N. K. **Otimização Computacional da Avaliação de Resultados de Ensaio Físico-químicos em Transformadores de Potência**. 2018. 98 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação. Goiânia – GO: UFG, 2018.

Esta dissertação teve por objetivo aplicar diferentes métodos computacionais de otimização e comparar seus desempenhos na avaliação dos resultados de ensaios físico-químicos em transformadores de potência. Apresentou-se a sistematização generalizada do método geral de avaliação e classificação denominado soma duplamente ponderada normalizada, que foi aprimorado por meio da redução de parâmetros, aplicado aos ensaios físico-químicos, e posteriormente otimizado, propiciando a avaliação do óleo isolante de transformadores de potência por meio de uma Nota Global. Os resultados demonstraram a capacidade do algoritmo evolutivo se adaptar muito bem ao problema específico. Ainda, as elevadas taxas de acertos obtidas por meio de otimizações explicitaram o potencial de aplicação do método da soma ponderada como ferramenta para auxílio ao diagnóstico de transformadores de potência, contribuindo para manutenções mais eficientes nesses equipamentos e um melhor acompanhamento na avaliação das suas condições operativas, impactando no aumento da confiabilidade do sistema elétrico.

Palavras-chave: algoritmo evolutivo; avaliação; ensaios físico-químicos; óleo isolante; otimização; transformadores de potência.

# Abstract

MOURA, N. K. **Computational Optimization of Evaluation of Results of Physicochemical Testing in Power Transformers**. 2018. 98 p. Thesis of Master of Science in Electrical and Computer Engineering. Goiânia – GO: UFG, 2018.

This dissertation aimed to apply several computational methods of optimization and compare their performance in the evaluation of results of physicochemical tests in power transformers. The systematic generalization of the general method of evaluation and classification – normalized doubly weighted sum –, was presented, it was improved by reducing parameters and it was applied to the physicochemical tests, which allowed the evaluation of the insulating oil of power transformers through a Global Note. The results highlighted the high adaptability of the evolutionary algorithm to this specific problem. Furthermore, the high accuracy rates obtained through optimizations explained the potential of applying the weighted sum method as a tool to aid the diagnosis of power transformers, contributing to more efficient maintenance in those devices and better monitoring of the evaluation of their operating conditions, improving the reliability of the electrical system.

Keywords: evaluation; evolutionary algorithm; insulating oil; optimization; physicochemical testing; power transformers.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de Permutação .....	46
Figura 2.2 – Operações realizadas no método Nelder-Mead Simplex para $n = 2$ .....	48
Figura 3.1 – Funções injetoras para mapeamento de valor da grandeza para nota .....	51
Figura 3.2 – Mapeamento de nota global para classificação global .....	56
Figura 3.3 – Fluxograma da aplicação do método de avaliação a ensaios físico-químicos .....	62
Figura 4.1 – Ciclo de interdependência entre os métodos de avaliação e otimização.....	63
Figura 4.2 – Fluxograma da estrutura do algoritmo de otimização.....	64
Figura 4.3 – Divisão da variável $X$ em quatro partes distintas .....	66
Figura 4.4 – Composição do conjunto de treinamento (218 ensaios físico-químicos).....	75
Figura 4.5 – Recapitulação da metodologia geral .....	76
Figura 5.1 – <i>Boxplot</i> do erro de treinamento para cada algoritmo de otimização.....	78
Figura 5.2 – <i>Boxplot</i> do tempo de execução do algoritmo para cada algoritmo de otimização.....	79
Figura 5.3 – Gráfico de dispersão do erro de validação em função do erro de treinamento ....	80
Figura 5.4 – Erro de treinamento e de validação das melhores soluções obtidas.....	81
Figura 5.5 – Evolução do erro de treinamento em função do número de avaliações.....	82
Figura 5.6 – Matriz de confusão da solução $X_3$ aplicada no conjunto de treinamento .....	85
Figura 5.7 – Gráfico de dispersão das grandezas físico-químicas duas a duas .....	87
Figura 5.8 – Correlação entre a tensão interfacial e o índice de neutralização .....	88

## **Lista de Quadros**

Quadro 3.1 – Discriminação das grandezas físico-químicas .....	57
Quadro 3.2 – Correspondência entre símbolos e classificações individuais e globais .....	58
Quadro 3.3 – Discriminação das faixas de tensão nominal consideradas na avaliação.....	58
Quadro 3.4 – Métodos de ensaio para a medição das grandezas .....	59
Quadro 3.5 – Critérios para a obtenção do Conceito Global e ações recomendadas.....	61

## Lista de Pseudocódigos

Pseudocódigo 4.1 – geraSoluçãoInicial.....	65
Pseudocódigo 4.2 – condiçõesContorno.....	66
Pseudocódigo 4.3 – desagrupa .....	66
Pseudocódigo 4.4 – agrupa.....	67
Pseudocódigo 4.5 – avaliaSolução .....	69
Pseudocódigo 4.6 – otimizaçãoHillClimbing.....	70
Pseudocódigo 4.7 – otimizaçãoEvolutivo .....	70
Pseudocódigo 4.8 – otimizaçãoPSO.....	71
Pseudocódigo 4.9 – otimizaçãoSimplex.....	72

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Critérios de classificação da Tensão Interfacial (mN/m).....	39
Tabela 2.2 – Critérios de classificação do índice de neutralização (mg KOH) .....	40
Tabela 2.3 – Critérios de classificação do índice de cor .....	41
Tabela 2.4 – Critérios de classificação da rigidez dielétrica (kV) .....	42
Tabela 2.5 – Critérios de classificação do teor de água (ppm) .....	42
Tabela 2.6 – Critérios de classificação do fator de potência e fator de dissipação .....	43
Tabela 3.1 – Forma geral do mapeamento entre faixas de valores e classificações .....	51
Tabela 3.2 – Forma geral do mapeamento entre classificações e notas individuais.....	52
Tabela 3.3 – Forma geral do mapeamento de nota global para classificação global.....	56
Tabela 3.4 – Limites das grandezas aplicados no método de análise .....	58
Tabela 4.1 – Cálculo da expressão dentro do somatório para cada amostra de óleo .....	68
Tabela 4.2 – Composição dos conjuntos de treinamento e validação.....	75
Tabela 5.1 – Avaliação estatística do erro de treinamento (em número absoluto de casos)....	78
Tabela 5.2 – Composição das melhores soluções obtidas .....	84

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CELG D	CELG Distribuição S.A.
FD	fator de dissipação
FP	fator de potência
IC	índice de cor
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional ( <i>International Electrotechnical Commission</i> )
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ( <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> )
IN	índice de neutralização
kV	quilovolt
mg KOH	miligrama de hidróxido de potássio
mN/m	milinewton por metro
NTC	Norma Técnica CELG-D
pH	potencial hidrogeniônico
ppm	parte por milhão
PSO	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
p.u.	por unidade
SDPN	Soma Duplamente Ponderada Normalizada
RD	rigidez dielétrica
TA	teor de água
TI	tensão interfacial

# Lista de Símbolos<sup>1</sup>

$c_p$	Conceito individual
$\mathbf{c_p}$	Classificações individuais simbólicas
$\mathbf{c_g}$	Classificações globais simbólicas
$c_g^c$	Conceito global calculado
$c_g^e$	Conceito global fornecido por uma equipe de especialistas
$\mathbf{E}$	Parâmetros da função exponencial
$Err$	Erro calculado por meio da função objetivo
$Err\%$	Erro percentual do treinamento
$k_M$	Parâmetro da função $\lambda(s_p)$
$\mathbf{l}$	Limites de nota entre conceitos finais distintos
$N_a$	Número de amostras de óleo isolante
$P$	Número de grandezas
$Q$	Número de possibilidades de variação do parâmetro
$s_p$	Nota individual
$s_g$	Nota global
$\mathbf{t}$	Limites de nota entre conceitos individuais distintos
$\text{tg } \delta$	Tangente delta
$V$	Número de faixas de classificação
$V_N$	Tensão nominal do transformador
$v_p$	Leitura da grandeza
$\mathbf{v_p^q}$	Limites das faixas de valores das grandezas
$\mathbf{w}$	Pesos em função da grandeza
$\mathbf{X}$	Vetor solução
$\lambda$	Peso em função da nota
$\lambda_M$	Parâmetro da função $\lambda(s_p)$

---

<sup>1</sup> Note que, nessa dissertação, convencionou-se a seguinte nomenclatura: os símbolos em negrito correspondem a vetores, enquanto os símbolos que não estão em negrito tratam-se de valores (escalares).

# Sumário

1	Introdução .....	29
1.1	Contextualização.....	29
1.2	Justificativa .....	30
1.3	Estrutura da dissertação .....	31
2	Fundamentação Técnico-Científica .....	33
2.1	Transformadores de potência.....	33
2.1.1	Manutenção corretiva não-planejada .....	35
2.1.2	Manutenção corretiva planejada .....	35
2.1.3	Manutenção preventiva .....	35
2.2	Ensaio físico-químico .....	37
2.2.1	Tensão interfacial .....	38
2.2.2	Índice de Neutralização .....	39
2.2.3	Índice de cor .....	40
2.2.4	Rigidez dielétrica .....	41
2.2.5	Teor de Água.....	41
2.2.6	Fator de potência e fator de dissipação .....	43
2.3	Métodos de otimização computacional.....	44
2.3.1	<i>Hill Climbing</i> associado à regra do 1/5 de sucesso .....	44
2.3.2	Algoritmo Evolutivo .....	45
2.3.3	Otimização por Enxame de Partículas .....	47
2.3.4	Nelder-Mead Simplex .....	47
2.3.5	Considerações finais sobre os métodos.....	48
3	Metodologia geral: Método de avaliação e classificação .....	49
3.1	Introdução .....	49
3.2	Modelo geral de avaliação e classificação .....	50
3.3	Aplicação do modelo aos ensaios físico-químicos .....	57
3.3.1	Parâmetros de entrada .....	57
3.3.2	Parâmetros otimizáveis .....	59
4	Metodologia Geral: Método de Otimização .....	63
4.1	Introdução .....	63

4.2	Estrutura do algoritmo de otimização .....	64
4.2.1	Obtenção da solução inicial .....	64
4.2.2	Condições de contorno .....	65
4.2.3	Avaliação da solução .....	67
4.2.4	Laço de repetição .....	69
4.3	Especificações .....	73
4.4	Banco de dados .....	74
4.5	Recapitulação da Metodologia Geral .....	76
5	Resultados .....	77
5.1	Resultados do treinamento .....	77
5.1.1	Avaliação estatística dos erros de treinamento .....	77
5.1.2	Avaliação estatística dos tempos de execução .....	79
5.2	Resultados da validação .....	80
5.3	Correlação entre as grandezas físico-químicas .....	86
6	Conclusões .....	89
	Referências .....	91
	APÊNDICE A – Estudos de caso .....	97

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

Os transformadores<sup>2</sup> são equipamentos vitais e de alto custo do sistema elétrico de potência [1], na medida em que são responsáveis por adequar os níveis de tensão e corrente, viabilizando a geração, a transmissão a longas distâncias e a distribuição de energia elétrica, com elevado rendimento e reduzidas perdas de potência. Uma vez que estes equipamentos representam uma parte significativa dos investimentos referentes à implantação do sistema, constata-se a necessidade do acompanhamento e do monitoramento das suas condições operativas, de seu sistema isolante e das condições de funcionamento de seus acessórios, objetivando a redução de custos inerentes ao ciclo de vida do transformador.

Sendo assim, o desenvolvimento e emprego de técnicas preditivas que objetivam incrementar a eficiência dos processos de manutenção preventiva são de fundamental importância para a preservação da vida útil de transformadores de potência. Tipicamente, um conjunto diversificado de métodos de avaliação da saúde de transformadores pode ser aplicado. Comumente são empregados o método de análise de gases dissolvidos no óleo isolante, os ensaios físico-químicos, o método de detecção de descargas parciais por emissão acústica e ensaios elétricos em geral.

Dentre as técnicas de manutenção em transformadores, os ensaios físico-químicos em óleo isolante são não-invasivos e não exigem o desligamento de equipamentos, sendo um conjunto de técnicas preditivas importante para o seu diagnóstico, uma vez que identificam o nível de degradação da isolação líquida. Assim sendo, ao detectar – por meio da aplicação dos ensaios físico-químicos – perdas de propriedades isolantes do óleo mineral, as equipes de manutenção podem atuar preventivamente e programar intervenções no equipamento antes que a falha ocorra, o que reduz os gastos e transtornos causados por interrupções não programadas.

Na literatura, existe uma diversidade de técnicas de diagnóstico que permitem indicar o problema em si, diagnosticando o transformador ([2] – [7], por exemplo), bem como

---

<sup>2</sup> Neste trabalho, o termo Transformador é utilizado, de forma geral, para designar tanto transformadores como autotransformadores.

permitem avaliar e classificar seu estado de saúde, atribuindo índices de saúde ([8] – [9], por exemplo). Os métodos voltados ao diagnóstico do estado dos transformadores são muito bem explorados, especialmente no que se refere aos mencionados acima. Em [8], por exemplo, são apresentados métodos com dependência linear dos parâmetros que compõem o método de análise, o que pode levar a resultados imprecisos, dada a não-linearidade natural de um processo de avaliação e classificação. Em [9], apesar de terem sido apresentados bons resultados quanto à taxa de acertos globais nas aplicações do método apresentado, constata-se uma alta taxa de acertos para conceitos bons e uma diminuição sensível da precisão para as piores classificações, o que pode ser preocupante, pois as piores classificações impactam mais fortemente nas tomadas de decisões. Assim, constata-se que é necessária a formulação de um modelo não-linear de avaliação e classificação, bem como a obtenção de taxas de acerto consideráveis e uniformes entre os possíveis conceitos atribuídos.

Usualmente, especialistas em análise de transformadores de potência, por meio de guias, recomendações ou normas (por exemplo, [10] – [18]), publicações de destaque (por exemplo, [19] – [24]) e pela própria experiência na área, classificam os estados de transformadores observando cada critério ou parâmetro isoladamente, ou mesmo tomando um subconjunto destes, para posterior agregação dos resultados, objetivando gerar classificações globais para o propósito de tomada de decisão acerca do conjunto de transformadores que compõem a planta instalada. Os resultados dessas análises podem ser utilizados para a formação de métodos de avaliação e classificação, de modo que os resultados das aplicações do conhecimento de especialistas podem ser mapeados computacionalmente, o que pode auxiliar sobremaneira o processo decisório acerca do planejamento da operação de tais equipamentos.

## **1.2 Justificativa**

Essa dissertação tem como objetivos comparar o desempenho de métodos de otimização em um problema específico de avaliação de óleo mineral isolante por meio de ensaios físico-químicos; e obter uma solução ótima, aplicável ao diagnóstico de óleo isolante de transformadores de potência, em conformidade com critérios de Engenharia de Manutenção, auxiliando na tomada de decisões e na elaboração de diagnósticos rápidos e eficientes.

Como contribuição, apresenta-se a sistematização generalizada do método da Soma Duplamente Ponderada e Normalizada (SDPN) [25], que foi aprimorado nesse trabalho. Este método é utilizado para a obtenção de notas e conceitos, possibilitando a avaliação e a classificação de equipamentos. Quando aplicado a transformadores de potência [25] – [31], especificamente aos resultados provenientes de ensaios físico-químicos realizados em amostras de óleo retiradas destes equipamentos, a SDPN provê uma avaliação global do estado de conservação do isolamento líquido do transformador, indicando a necessidade de possíveis intervenções preventivas, isto é, atuando quando houver indícios de anomalias, antes que a falha propriamente dita ocorra. Consequentemente, espera-se contribuir com uma redução no número de interrupções não programadas, conferindo maior confiabilidade ao sistema elétrico de potência.

Ademais, destaca-se que este trabalho encontra-se entre os produtos resultantes do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento número 321, da Universidade Federal de Goiás em parceria com a CELG Distribuição (atualmente ENEL Goiás), apresentando também contribuições importantes para o andamento do projeto [25] – [35].

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A redação dessa dissertação de mestrado é estruturada em seis capítulos um apêndice, expostos a seguir.

No Capítulo 2, são discutidas as fundamentações teóricas sobre os temas referentes a esta dissertação. Serão englobados primeiramente assuntos gerais sobre transformadores de potência e manutenção preventiva. Ademais, serão abordados critérios de avaliação publicados em normas, guias, teses de doutorado e artigos nacionais e internacionais aplicados nos ensaios físico-químicos de tensão interfacial, índice de neutralização, índice de cor, rigidez dielétrica, teor de água e fator de potência. Na última parte do capítulo, serão discutidos os métodos computacionais utilizados na otimização do equacionamento, sendo estes o algoritmo de *Hill Climbing*, o algoritmo evolutivo, a otimização por enxame de partículas (PSO) e o método Nelder-Mead Simplex.

A metodologia geral empregada nessa dissertação foi dividida entre os Capítulos 3 e 4. O Capítulo 3 contém a descrição sistematizada e generalizada do método geral de avaliação e classificação denominado Soma Duplamente Ponderada e Normalizada, no qual são

enumeradas as informações necessárias para viabilizar o emprego do método. Ademais, é desenvolvido um equacionamento para a obtenção de uma nota e um conceito globais, com a indicação dos parâmetros otimizáveis e suas condições de contorno. Na seção final desse capítulo, o método SDPN é aplicado ao problema de avaliação dos ensaios físico-químicos por meio da definição numérica de todos os parâmetros de entrada do modelo.

Por outro lado, no Capítulo 4 é descrito o método de otimização empregado nessa dissertação, visando à obtenção dos valores ótimos ou quase-ótimos para as variáveis do método de avaliação e classificação, na qual as avaliações foram feitas por meio de comparações com os registros de uma base de dados reais. São discutidos todos os recursos, algoritmos utilizados e suas especificações, além de uma visão geral do banco de dados utilizado nessa etapa do trabalho.

O Capítulo 5 contém os resultados que foram obtidos por meio da aplicação do método de otimização na avaliação e classificação dos ensaios físico-químicos, considerando uma análise do erro e do tempo de execução na fase de treinamento, a aplicação das soluções em uma nova base de dados para a fase de validação e, finalmente, um estudo da correlação entre as grandezas físico-químicas.

No Capítulo 6, têm-se as conclusões deste trabalho, comprovando a aplicabilidade dos resultados obtidos por meio de otimização computacional, a eficiência no emprego de métodos de otimização computacional e as contribuições da SDPN e dos métodos computacionais aplicados aos ensaios físico-químicos em termos da avaliação e classificação de transformadores de potência.

Finalmente, no Apêndice A, são ilustrados alguns estudos de caso referentes à aplicação das soluções obtidas por meio de otimização em resultados reais de ensaios físico-químicos do óleo isolante de transformadores de potência.

## 2 Fundamentação Técnico-Científica

O objetivo deste capítulo é apresentar a fundamentação técnico-científica sobre os temas referentes a esta dissertação, sendo eles:

- a) Transformadores de potência;
- b) Ensaio físico-químico; e
- c) Métodos de otimização computacional empregados.

### 2.1 Transformadores de potência

O transformador [36] – [38] é um equipamento que consiste de um núcleo fechado, formado por lâminas de material magnético e por enrolamentos geralmente feitos de cobre – podendo envolver ou ser envolvido por eles –, viabilizando o transporte da energia elétrica, ou potência elétrica, desde o local de sua geração até o ponto de sua utilização, transformando tensões e correntes de um circuito elétrico.

Em razão de limitações impostas pela espessura da isolação, a construção e instalação mais econômica dos geradores síncronos é conveniente a tensões de até 25 kV [36]. Por outro lado, de forma a possibilitar alta capacidade de potência com perdas relativamente baixas, é conveniente que a transmissão da energia elétrica a grandes distâncias desde o gerador até o consumidor seja efetuado em níveis de tensão elevados, podendo ultrapassar 700 kV. Finalmente, por questões de segurança humana, são utilizados baixos níveis de tensão na entrega ao consumidor.

Portanto, em todo sistema de energia elétrica, existe sempre a necessidade de adequar níveis de tensões e correntes, o que torna muito importante a função desempenhada pelos transformadores de potência: eles são a conexão entre geradores e linhas de transmissão e entre linhas de diferentes níveis de tensão. Finalmente, estes equipamentos também abaixam a tensão para os níveis de distribuição primária – tais como 13,2 kV e 13,8 kV em áreas urbanas – e para os níveis de distribuição secundária – para o uso residencial, por exemplo.

É importante ressaltar que, nos terminais de entrada de um transformador (primário), há o suprimento de energia elétrica pela fonte, a qual é convertida em energia eletromagnética

e, na sequência, reconvertida em energia elétrica. Esta é disponibilizada ao secundário, onde as cargas dos consumidores são conectadas em um nível de tensão diferente do primário.

Estes equipamentos são altamente eficientes (chegando a quase 100% de rendimento) e muito confiáveis. Além disso, os transformadores são providos de comutadores de derivações que, frequentemente, possibilitam ajustes de tensão em carga, visando manter níveis de tensão adequados para todos os consumidores, sob regulamentação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [39].

Considerando que os transformadores são de fundamental importância para o sistema elétrico de potência e representam uma fração significativa dos investimentos relativos a este sistema (custos de aquisição, transporte e instalação, por exemplo), é necessária a adoção de procedimentos de manutenção que visem a reduzir os custos associados ao seu ciclo de vida, direcionados à investigação de anomalias. Dentre os procedimentos, estão o acompanhamento e o monitoramento das suas condições operativas, de seu sistema isolante e das condições de funcionamento de seus acessórios, garantindo confiabilidade e a sua durabilidade.

Nesse contexto, é importante ressaltar a distinção entre defeitos e falhas. O defeito consiste de uma anomalia em um equipamento que pode levá-lo a funcionar de forma irregular ou abaixo de sua capacidade nominal, sem, todavia, causar a interrupção de seu funcionamento. Se um defeito não for corrigido a tempo, pode evoluir a uma falha e forçar a retirada de serviço do equipamento. Dentre os defeitos, podem ser citados: aquecimento acima do previsto; vibrações excessivas; vazamento de óleo; descargas elétricas em estágio inicial; mau funcionamento de ventiladores; e problemas no sistema de vedação com penetração de umidade.

Por outro lado, a falha se caracteriza por uma anomalia que leva forçosamente à interrupção do funcionamento do equipamento, ou seja, retirando-o de serviço. Trata-se, portanto, de uma situação mais grave que um defeito, exigindo atuação das equipes de manutenção em caráter de emergência (imediate). Rompimento de rigidez dielétrica de isolamento não-regenerativa; quebra de componente essencial do equipamento; e explosão de bucha são exemplos de falhas que podem acontecer em um transformador de potência.

Assim sendo, os procedimentos de manutenção visam a manter um dado equipamento ou sistema em perfeitas condições de funcionamento. No caso de um transformador, a manutenção deve garantir ao mínimo que o sistema elétrico não fique sem a energia que

obtem dele. Com base no conceito de manutenção, pode-se dividir a manutenção em alguns tipos principais, conforme apontam Kardec e Nascif em [40]:

- a) Manutenção corretiva não-planejada;
- b) Manutenção corretiva planejada;
- c) Manutenção preventiva.

### **2.1.1 Manutenção corretiva não-planejada**

A manutenção corretiva [40] consiste da atuação sobre um defeito ou falha que já ocorreu. No caso de manutenção não-planejada, trata-se de uma situação de emergência, na qual há altos custos – diretos e indiretos, por exemplo, indenizações por perda de produção de processos contínuos em indústrias e multas por parte do agente regulador – decorrentes da interrupção não programada no fornecimento de energia elétrica. Há também grande insatisfação dos consumidores, prejuízo aos índices de medição e qualidade de fornecimento, perdas de arrecadação decorrentes da interrupção do fornecimento de energia elétrica e maiores riscos de acidente de trabalho na execução dos procedimentos de manutenção de emergência [41]. Desse modo, uma equipe eficiente de engenharia de manutenção busca ao máximo adotar procedimentos de forma a evitar a ocorrência de intervenções não-planejadas.

### **2.1.2 Manutenção corretiva planejada**

A manutenção corretiva planejada [40] é um aperfeiçoamento da manutenção corretiva não planejada, sendo mais rápida, mais barata e mais segura que a primeira. Embora se permita que o equipamento opere até a condição de falha, há sempre algum planejamento – seja pela substituição do equipamento por outro idêntico ou a utilização de um kit de reparo rápido. Vale ressaltar que, nesse caso, diminuem-se os riscos para o pessoal e para a instalação.

### **2.1.3 Manutenção preventiva**

A manutenção preventiva caracteriza-se pelos procedimentos realizados de forma a acompanhar periodicamente as características e propriedades dos diversos componentes do sistema; verificar indicativos e tendências de defeitos e falhas; e intervir quando se constata

que determinado equipamento se encontra na iminência de falhar, reduzindo ou evitando a ocorrência de falhas quando estas ainda se encontram em estágio inicial (incipiente).

Dentre suas vantagens [41], a manutenção preventiva é programada, podendo ocorrer sem interrupção do fornecimento de energia elétrica e, por consequência, não há transtorno aos consumidores. Além disso, apresenta menor risco de acidentes com equipe de campo, o tempo de substituição do equipamento é menor, bem como o custo da logística das ações das equipes de manutenção.

Na área de manutenção preventiva de transformadores, existem diversos ensaios e técnicas visando ao diagnóstico de equipamentos, e uma quantidade razoável de instrumentos para esta finalidade, abrangendo desde funções mais simples e tradicionais, como a medição da temperatura do óleo isolante, até as tecnologias de emissão acústica, que permitem o monitoramento dos níveis de descargas parciais com o transformador em funcionamento. As principais técnicas preditivas de manutenção preventiva são:

- a) Ensaios físico-químicos do óleo, que avaliam mudanças das suas propriedades, indicando se a isolação líquida se encontra em bom estado de conservação ou degradada, além de inferir o estado do papel isolante [42] – [43];
- b) Análise de gases dissolvidos, que detecta pequenas quantidades de gases geradas a partir do óleo isolante quando o equipamento é submetido a determinadas anomalias (falhas incipientes) de natureza elétrica ou térmica. A composição dos gases produzidos depende do tipo de anormalidade apresentada, sendo que o diagnóstico é feito a partir da avaliação individual dos níveis de gases, da interpretação da correlação entre gases e da sua evolução ao longo da utilização do transformador [2] –[3],[14];
- c) a termografia é utilizada para verificar a temperatura da superfície de determinadas partes do transformador, principalmente o sistema de refrigeração e pontos de conexão de terminais das buchas, detectando a ocorrência de pontos quentes nas partes externas do equipamento [44];
- d) ensaios elétricos em geral, que permitem diagnosticar o transformador quanto à existência de deformações e deslocamentos mecânicos de componentes da parte ativa e anomalias no sistema isolante, no circuito elétrico ou no núcleo magnético [13], e
- e) A detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica é uma técnica preditiva, não invasiva e sem desligamento, que tem como objetivo

localizar falhas elétricas incipientes decorrentes da atividade de descargas parciais internas ao transformador, localizando as coordenadas tridimensionais exatas da região onde está ocorrendo a atividade elétrica indesejada [4].

Além da aplicação das principais técnicas, faz-se necessária a avaliação do carregamento do transformador [45], com objetivo de proporcionar o máximo aproveitamento da potência de maneira segura e confiável, sem que haja danos ou comprometimento da expectativa de vida útil do mesmo. Existem, todavia, carregamentos que podem causar sérios danos, ocasionando falhas na isolação. Nesse sentido, todos os riscos devem ser cuidadosamente considerados e a avaliação da condição do transformador deve ser realizada antes de submetê-lo a um carregamento acima do nominal.

Outrossim, nota-se que o perfil de carga do equipamento apresenta correlação com a atividade de anomalias elétricas e térmicas, por exemplo, de modo que a equipe especialista em diagnóstico deve permanecer atenta também a defeitos que apresentem baixa atividade em carregamentos abaixo do nominal, porque estes defeitos podem se tornar preocupantes quando sua magnitude é corrigida ao referencial de carregamento nominal, igual a 1,0 p.u.

Os resultados da aplicação das técnicas devem ser utilizados para estabelecer procedimentos de manutenção preventiva assim que anomalias sejam detectadas em estágio incipiente, evitando falhas prematuras e estendendo a vida útil do equipamento. Vale ressaltar que diferentes técnicas apresentam diferentes níveis de sensibilidade na detecção de determinada anomalia, sendo necessário, portanto, que a equipe de engenheiros responsáveis avalie cada situação norteada pelo histórico do equipamento e pelos resultados de um conjunto amplo de técnicas que proporcione uma visão holística do transformador.

Assim sendo, o principal objetivo da aplicação de técnicas de manutenção preventiva trata-se da redução de custos, sanções por parte da ANEEL e transtornos aos consumidores causados por interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica, garantindo maior qualidade e confiabilidade ao sistema elétrico de potência.

## **2.2 Ensaio físico-químico**

Os ensaios físico-químicos são um conjunto de técnicas preditivas não invasivas e que não exigem desligamento do transformador, empregados pela engenharia de manutenção visando à manutenção preventiva. Por meio da realização destes ensaios em transformadores,

obtêm-se os valores das principais grandezas que caracterizam o estado do óleo isolante (em condições adequadas ou degradado), sendo elas [16]:

- a) Tensão interfacial (TI);
- b) Índice de neutralização (IN);
- c) Índice de cor (IC);
- d) Rigidez dielétrica (RD);
- e) Teor de água (TA); e
- f) Fator de potência (FP).

Há, além desse conjunto de ensaios, outras grandezas que podem ser utilizadas no diagnóstico de equipamentos, tais como a contagem de partículas, teor de DBDS e teor de 2-Furfural e outros aldeídos dissolvidos no óleo mineral isolante. Contudo, para a realização deste trabalho, o subconjunto destes seis ensaios físico-químicos mostrou-se adequado na avaliação do estado de conservação das amostras de óleo isolante de transformadores.

### 2.2.1 Tensão interfacial

A tensão interfacial [17] – [23] está relacionada à coesão entre as moléculas do óleo isolante, sendo um parâmetro para acompanhamento da tendência à formação de borra no óleo, que é resultado de sua oxidação. Tensões interfaciais baixas caracterizam óleos oxidados, que aceleram o processo de degradação da celulose e, por promoverem a formação de borra, reduzem a eficiência de troca de calor do equipamento. Por conseguinte, o transformador passa a operar com temperatura ligeiramente mais elevada, o que acelera a degradação do óleo, elevando seu índice de acidez, dando continuidade a este ciclo vicioso. Uma redução abrupta da tensão interfacial pode indicar problemas de compatibilidade entre materiais ou contaminação acidental durante o preenchimento do transformador com óleo.

Os critérios de classificação desse parâmetro são apresentados na e auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 2.1, na unidade mN/m. Observa-se que algumas publicações (por exemplo, o guia IEEE [18]) estabelecem faixas de classificação variando em função da tensão nominal do equipamento<sup>3</sup>, considerando-se a necessidade da utilização de óleos de melhor qualidade para prover um isolamento mais robusto a fim de isolar tensões  $V_N$  (em quilovolts) mais elevadas.

---

<sup>3</sup> Sendo a tensão nominal do transformador (em quilovolts) igual à tensão nominal de seu enrolamento de maior tensão.

Vale ressaltar que esta dissertação encontra-se entre os produtos resultantes do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento número 321, da Universidade Federal de Goiás em parceria com a CELG Distribuição (atualmente ENEL Goiás), de modo que os critérios expostos em 93[25] foram desenvolvidos pela equipe em um momento anterior e auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 2.1 – Critérios de classificação da Tensão Interfacial (mN/m)

<b>IEC 60422 [17] Método ASTM D971</b>			<b>IEEE C57.106-2015 [18] Método ASTM D971</b>		
	<i>Óleo inibido</i>	<i>Não inibido</i>	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>Bom</i>	> 28	> 25	<i>Valor limite</i>	25	30
<i>Aceitável</i>	22 – 28	20 – 25		32	
<i>Pobre</i>	< 22	< 20			
<b>Li et al [19]</b>			<b>Jahromi et al [20]</b>		
$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
$\geq 25$	$\geq 30$	$\geq 32$	<i>A</i>	$\geq 25$	$\geq 30$
20-25	23 – 30	25 – 32	<i>B</i>	20 – 25	23 – 30
15-20	19 – 23	20 – 25	<i>C</i>	15 – 20	18 – 23
<15	< 19	< 20	<i>D</i>	$\leq 15$	$\leq 18$
<b>FIST [21]</b>			<b>Paul [22] Método ASTM D971</b>		
<i>Bons óleos</i>		40 – 50	<i>Satisfatório</i>		40
<i>Recuperar</i>		< 25	<i>Recondicionar</i>		> 40
<i>Formação de borra</i>		< 22			
<b>Marques et al [25] Método ABNT NBR 6234</b>			<b>Gray [23]</b>		
<i>Excelente</i>		$\geq 40$	<i>Bom</i>		30,0 – 45,0
<i>Bom</i>		27 – 40	<i>Proposição A</i>		27,1 – 29,9
<i>Marginal</i>		24 – 27	<i>Marginal</i>		24,0 – 27,0
<i>Ruim</i>		18 – 24	<i>Ruim</i>		18,0 – 23,9
<i>Péssimo</i>		< 18	<i>Muito ruim</i>		14,0 – 17,9
			<i>Extremo</i>		9,0 – 13,9

Nota:  $V_N$  em quilovolts (*kV*).

Fonte: Próprio autor (2018).

## 2.2.2 Índice de Neutralização

O índice de neutralização [17] – [23] está relacionado ao potencial hidrogeniônico (pH) do óleo, o qual promove a degradação da isolação sólida, composta, basicamente, por celulose. Assim, um índice de neutralização elevado implica na aceleração do processo de polimerase da celulose, alterando importantes características da isolação sólida (em especial do papel que envolve os enrolamentos), tais como a rigidez dielétrica e a resistência

mecânica. Igualmente, a acidez do óleo pode ser responsável pela corrosão de partes metálicas do transformador. Os critérios de classificação do índice de neutralização (em mg KOH por grama de óleo) são descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Critérios de classificação do índice de neutralização (mg KOH)

IEC 60422 [17] Método IEC 62021			IEEE C57.106-2015 [18] Método ASTM D974				
	$V_N \leq 72,5$	$72,5 < V_N \leq 170$	$V_N > 170$	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$	
<i>Bom</i>	< 0,15	< 0,10	< 0,10	<i>Valor limite</i>	0,20	0,15	0,10
<i>Aceit.</i>	0,15 – 0,30	0,10 – 0,20	0,10 – 0,15				
<i>Pobre</i>	> 0,30	> 0,20	> 0,15				
Jahromi et al [20]			Li et al [19]				
	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$	
<i>A</i>	< 0,05	< 0,04	< 0,03	< 0,05	< 0,04	< 0,03	
<i>B</i>	0,05 – 0,10	0,04 – 0,10	0,03 – 0,07	0,05 – 0,10	0,04 – 0,10	0,03 – 0,07	
<i>C</i>	0,10 – 0,20	0,10 – 0,15	0,07 – 0,10	0,10 – 0,20	0,10 – 0,15	0,07 – 0,10	
<i>D</i>	> 0,20	> 0,15	> 0,10	> 0,20	> 0,15	> 0,10	
FIST [21]			Paul [22] Método ASTM D974				
<i>Recuperar</i>	> 0,2		<i>Satisfatório</i>	0,40			
<i>Formação de borra</i>	> 0,4		<i>Recondicionar</i>	0,40 – 1,00			
Marques, et al [25] Método ABNT NBR 14248		Dongale [24] FP (%)	Gray [23]				
<i>Excelente</i>	$\leq 0,03$	$\leq 0,4$ 0,4 – 0,7 0,8 – 1,0 $\geq 1,0$	<i>Bom</i>	0,00 – 0,10			
<i>Bom</i>	0,03 – 0,10		<i>Proposição A</i>	0,05 – 0,10			
<i>Marginal</i>	0,10 – 0,15		<i>Marginal</i>	0,10 – 0,15			
<i>Ruim</i>	0,15 – 0,40		<i>Ruim</i>	0,16 – 0,40			
<i>Péssimo</i>	> 0,40		<i>Muito ruim</i>	0,41 – 0,65			
			<i>Extremo</i>	0,66 – 1,50			
			<i>Desastroso</i>	$\geq 1,51$			

Nota:  $V_N$  em quilovolts ( $kV$ ).

Fonte: Próprio autor (2018).

### 2.2.3 Índice de cor

O índice de cor [17] – [20] é um parâmetro visual associado à degradação do óleo mineral isolante. Amostras de óleo novo apresentam baixo índice de cor, sendo praticamente transparentes. Por outro lado, amostras envelhecidas apresentam índice de cor elevado, devido às suas cores mais escuras, características de fluido degradado. Embora o índice de cor não seja uma propriedade crítica, ele pode ser útil na avaliação, principalmente ao comparar os dados do ensaio com o histórico do equipamento. Os critérios de classificação desse parâmetro são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Critérios de classificação do índice de cor

Li et al [19]		Jahromi et al [20]		
amarelo claro		<i>A</i>		$\leq 1,5$
amarelo		<i>B</i>		1,5 – 2,0
amarelo escuro		<i>C</i>		2,0 – 2,5
marrom chocolate		<i>D</i>		$\geq 2,5$
Marques et al [25] Método ABNT NBR 14483		IEEE C57.152-2013 [13]		
<i>Excelente</i>	$\leq 1,0$	<i>Novo</i>	0,0 – 0,5	Amarelo claro
<i>Bom</i>	1,0 – 2,5	<i>Bom</i>	0,5 – 1,0	Amarelo
<i>Marginal</i>	2,5 – 4,0	<i>Envelhecido</i>	1,0 – 2,5	Amarelo brilhante
<i>Ruim</i>	4,0 – 5,5	<i>Marginal</i>	2,5 – 4,0	Âmbar
<i>Péssimo</i>	$> 5,5$	<i>Ruim</i>	4,0 – 5,5	Marrom
		<i>Severo</i>	5,5 – 7,0	Marrom escuro
		<i>Extremo</i>	7,0 – 8,5	Preto
IEC 60422 [17] Método ISO 2049		Paul [22] Método ASTM D1500		
<i>Bom</i>	Claro e sem contaminação	<i>Satisfatório</i>		3,5
<i>Pobre</i>	Escuro e/ou turbido	<i>Recondicionar</i>		$> 3,5$

Fonte: Próprio autor (2018).

### 2.2.4 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica [17] – [22] mede a capacidade do óleo de manter suas características de fluido isolante quando submetido à ação de um campo elétrico intenso. A partir de certa intensidade, este campo ocasiona a ionização dos átomos componentes do óleo, resultando na ruptura do dielétrico. Valores elevados de rigidez dielétrica indicam que o óleo é capaz de manter suas características dielétricas mesmo quando submetido a diferenças de potencial elevadas, o que é desejável em se tratando de equipamentos que operam com tensões elevadas, como é o caso dos transformadores de potência. Os critérios de classificação parâmetro (em kV) são apresentados na Tabela 2.4.

### 2.2.5 Teor de Água

A grandeza teor de água [17] – [20] define a quantidade de água presente no óleo, sendo, portanto, de grande importância para o acompanhamento das condições operativas do sistema isolante de transformadores de potência: em um óleo em boas condições, esta grandeza deve ser a menor possível, de forma a não comprometer as características dielétricas do fluido. Logo, a presença de água no óleo é um dos fatores que contribui para a redução de

sua rigidez dielétrica e para o aumento do seu fator de potência. Sendo assim, os critérios para obtenção do conceito do teor de água (em partes por milhão) definidos na literatura são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 – Critérios de classificação da rigidez dielétrica (kV)

<b>IEC 60422 [17]</b> <b>Método IEC 60156</b>				<b>IEEE C57.106-2015 [18]</b> <b>Método ASTM D1816</b>			
	$V_N \leq 72,5$	$72,5 < V_N \leq 170$	$V_N > 170$	<i>Limite</i>	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>Bom</i>	> 40	> 50	> 60	<i>gap 1mm</i>	23	28	30
<i>Aceitável</i>	30 – 40	40 – 50	50 – 60	<i>gap 2mm</i>	40	47	50
<i>Pobre</i>	< 30	< 40	< 50				
<b>Li et al [19]</b>				<b>Jahromi et al [20]</b>			
	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$	<i>gap 2mm</i>	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
	$\geq 40$	$\geq 47$	$\geq 50$	<i>A</i>	$\geq 45$	$\geq 52$	$\geq 60$
	35 – 40	42 – 47	45 – 50	<i>B</i>	35 – 45	47 – 52	50 – 60
	30 – 35	35 – 42	40 – 45	<i>C</i>	30 – 35	35 – 47	40 – 50
	< 30	< 35	< 40	<i>D</i>	$\leq 30$	$\leq 35$	$\leq 40$
<b>Marques et al [25]</b> <b>Método ABNT NBR IEC 60156</b>				<b>FIST [21]</b> <b>Método ASTM D-1816</b>			
	$V_N \leq 34,5$	$34,5 < V_N < 138$	$V_N \geq 138$		$V_N < 288$	$V_N \geq 288$	
<i>Excelente</i>	$\geq 75$	$\geq 80$	$\geq 85$	<i>Mínimo</i>	20	25	
<i>Bom</i>	60 – 75	65 – 80	70 – 85				
<i>Marginal</i>	45 – 60	50 – 65	55 – 70				
<i>Ruim</i>	35 – 45	40 – 50	45 – 55				
<i>Péssimo</i>	< 35	< 40	< 45				
				<b>Paul [22]</b> <b>Método ASTM D877</b>			
				<i>Satisfatório</i>		23	
				<i>Recondicionar</i>		< 23	

Nota:  $V_N$  em quilovolts (kV).

Fonte: Próprio autor (2018).

Tabela 2.5 – Critérios de classificação do teor de água (ppm)

<b>IEC 60422 [17]</b> <b>Método IEC 60814</b>				<b>IEEE C57.106-2015 [18]</b> <b>Método ASTM D1533</b>			
	$V_N \leq 72,5$	$72,5 < V_N \leq 170$	$V_N > 170$		$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>Bom</i>	< 30	< 20	< 15	<i>Valor limite</i>	35	25	20
<i>Aceitável</i>	30 – 40	20 – 30	15 – 20				
<i>Pobre</i>	> 40	> 30	> 20				
<b>Marques et al [25]</b> <b>Método ABNT NBR 10710</b>				<b>Jahromi et al [20]</b>			
	$V_N \leq 34,5$	$34,5 < V_N < 138$	$V_N \geq 138$		$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>Excelente</i>	$\leq 15$	$\leq 10$	$\leq 5$	<i>A</i>	$\leq 30$	$\leq 20$	$\leq 15$
<i>Bom</i>	15 – 25	10 – 20	5 – 15	<i>B</i>	30 – 35	20 – 25	15 – 20
<i>Marginal</i>	25 – 35	20 – 30	15 – 25	<i>C</i>	35 – 40	25 – 30	20 – 25
<i>Ruim</i>	35 – 45	30 – 40	25 – 35	<i>D</i>	$\geq 40$	$\geq 30$	$\geq 25$
<i>Péssimo</i>	> 45	> 40	> 35				

Nota:  $V_N$  em quilovolts (kV).

Fonte: Próprio autor (2018).

### 2.2.6 Fator de potência e fator de dissipação

O fator de potência (FP) [18] (também chamado de  $\cos \varphi$ ) é a razão entre as perdas dielétricas e a potência absorvida pelo dielétrico, estando diretamente relacionada à presença de contaminantes ou compostos polares no óleo, sendo, portanto, um indicador de qualidade. Desta forma, são desejáveis valores de fator de potência reduzidos. Quanto menor o fator de potência, menores são as perdas dielétricas no óleo e melhor sua qualidade.

Por outro lado, o fator de dissipação (FD) [17] (denominado também  $\text{tg } \delta$ ) destina-se a mensurar a proporção das correntes de fuga resistivas em relação às correntes capacitivas por meio do óleo isolante, sendo também um indicador de qualidade da isolação líquida.

Assim sendo, o dielétrico pode ser modelado por uma resistência elétrica (indicativa das imperfeições do material isolante) em paralelo com uma capacitância ideal. No entanto, quando a reatância capacitiva é muito maior que a resistência (o que é comum nesse tipo de ensaio), a componente capacitiva da corrente é ligeiramente menor que a corrente total, resultando em valores muito próximos das grandezas  $\cos \varphi$  e  $\text{tg } \delta$ , conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Critérios de classificação do fator de potência e fator de dissipação

IEC 60422 [17] Método IEC 60247 – FD (%) a 90°C			IEEE C57.106-2015 [18] Método ASTM D924 – FP (%)			
	$V_N \leq 170$	$V_N > 170$	<i>Limite</i>	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>Bom</i>	< 0,10	< 0,10	25°C	0,5	0,5	0,5
<i>Aceitável</i>	0,10 – 0,50	0,10 – 0,20	90°C	5,0	5,0	5,0
<i>Pobre</i>	> 0,50	> 0,20				
Jahromi et al [20] FD (%) a 25°C		FIST [21] FP (%) a 25°C		Li et al [19] FD (%) a 90°C		
<i>A</i>	$\leq 0,1$	<i>Limite</i>	< 0,50	$V_N \leq 69$	$69 < V_N < 230$	$V_N \geq 230$
<i>B</i>	0,1 – 0,5	<i>Investigar</i>	0,50 – 1,00	< 1,5	< 1,0	< 0,5
<i>C</i>	0,5 – 1,0	<i>Recuperar</i>	> 1,00	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	0,5 – 1,0
<i>D</i>	$\geq 1,0$	<i>Remover</i>	> 2,00	3,0 – 4,0	1,5 – 3,0	1,0 – 2,0
				$\geq 4,0$	$\geq 3,0$	$\geq 2,0$
Marques et al [25] Método ABNT NBR 12133 – FP (%) a 90°C		Dongale [24] FP (%)		Paul [22] Método ASTM D924 – FP(%)		
<i>Excelente</i>	$\leq 0,30$	< 0,05		<i>Satisfatório</i> $\leq 0,5$ <i>Recondicionar</i> $> 0,5$		
<i>Bom</i>	0,30 – 1,00	0,05 – 0,50				
<i>Marginal</i>	1,00 – 2,50	0,50 – 1,00				
<i>Ruim</i>	2,50 – 4,00	1,00 – 2,00				
<i>Péssimo</i>	> 4,00	> 2,00				

Nota:  $V_N$  em quilovolts (*kV*).

Fonte: Próprio autor (2018).

Nesse contexto, os resultados e as conclusões obtidas nessa dissertação a partir do fator de potência também são inteiramente válidos e aplicáveis para o fator de dissipação. Os critérios de classificação do FP e FD, conforme a literatura, são apresentados na Tabela 2.6.

## 2.3 Métodos de otimização computacional

No desenvolvimento deste trabalho, foram empregados os seguintes métodos computacionais de otimização, que serão descritos a seguir.

- a) *Hill Climbing* associado à regra de 1/5 de sucesso;
- b) Algoritmo Evolucionário;
- c) Otimização por Enxame de Partículas; e
- d) Nelder-Mead Simplex.

### 2.3.1 *Hill Climbing* associado à regra do 1/5 de sucesso

O algoritmo de procura de *Hill Climbing* [46] – [47] trata-se de um laço de repetição que se move continuamente na direção da diminuição (ou aumento, quando for o caso) de valor da função objetivo. Este algoritmo tem como vantagens a simplicidade da estrutura do algoritmo (só precisa gravar o estado e sua avaliação) e o baixo esforço computacional empregado na resolução de problemas. No entanto, tem três desvantagens bem conhecidas: os mínimos locais; os platôs; e os cumes.

A respeito dos mínimos locais, uma vez que a solução alcance um ponto de mínimo, o algoritmo não encontrará progresso nas vizinhanças, mesmo que esta solução esteja muito longe de ser a ideal. Já os platôs são áreas do espaço de busca onde a função objetivo é essencialmente plana. Ao procurar uma solução melhor nessa região, o algoritmo apresentará dificuldades, haja vista que faltam informações sobre a direção que deve ser seguida para que se encontra um ponto de mínimo. Por fim, quando um cume apresenta inclinação muito suave, a busca da função objetivo pode oscilar em torno dele, apresentando pouco ou nenhum progresso.

Vale ressaltar que o sucesso do *Hill Climbing* depende muito da forma da superfície: se a função objetivo for bem comportada, uma boa solução será encontrada muito rapidamente. No entanto, se a função for mais complexa, apresentando muitas variáveis e

muitos pontos de mínimos, platôs ou cumes, a busca pode não conseguir identificar o mínimo global.

Mantida constante a perturbação na solução atual, o algoritmo eventualmente convergirá para uma solução ótima, mas não há limitações para o tempo em que isto ocorrerá. O valor inicial da perturbação é decidido de forma arbitrária, mas Rechenberg [48] criou uma regra para atualizá-lo no decorrer das iterações, que pode aumentar a velocidade de convergência, que ficou conhecida como a regra de 1/5 de sucesso.

O emprego da “regra de 1/5 de sucesso”, que confere capacidade de adaptação ao processo de busca, possibilita aumentar o desvio aplicado à geração de uma proposta vizinha de solução quando a quantidade de sucessos é relativamente grande (uma vez que, provavelmente a busca está ocorrendo longe de algum ponto de mínimo), expandindo a busca a regiões maiores, ao passo que, quando a quantidade de sucessos é pequena (quando, provavelmente a busca está perto de um mínimo local), prefere-se concentrar a procura em uma região menor do espaço de busca. Essa combinação confere um balanço entre exploração global (*exploration*) e exploração local (*exploitation*) ao processo de busca por soluções ótimas ou quase-ótimas, acelerando a convergência do algoritmo [47].

### 2.3.2 Algoritmo Evolutivo

O Algoritmo Evolutivo [49] – [51] é um processo de busca que imita a seleção natural das espécies por meio do processo de evolução Darwiniana [52]. Os indivíduos de um mesmo *habitat* competem entre si na procura da solução ótima nas melhores regiões do espaço de busca. Estes mesmos indivíduos reproduzem-se (por meio de permutações, o que representa a meiose celular), gerando descendentes geneticamente mais evoluídos e mais aptos à sobrevivência no *habitat*.

O processo de seleção natural ocorre em dois momentos neste algoritmo: no primeiro, somente os melhores indivíduos se reproduzem e propagam sua genética através das gerações; para que, em seguida, somente os descendentes mais aptos sobrevivam no *habitat*. Por outro lado, os piores indivíduos não se reproduzem nem sobrevivem ao processo de evolução.

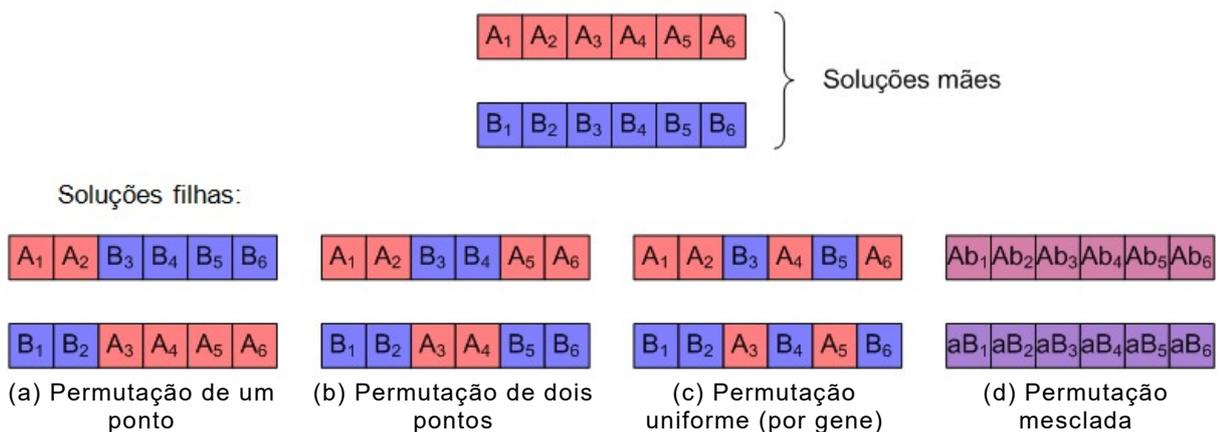
O algoritmo evolutivo apresenta como vantagem a facilidade de adaptação a diferentes formatos da função, seja ela descontínua, não diferenciável, não linear ou de dimensão

elevada, uma vez que o método provê uma estrutura de amostragem de grandes espaços de busca, evidenciando sua aplicabilidade a problemas muito específicos.

Interpretando a analogia com a Evolução Darwiniana, cada indivíduo é representado por um cromossomo, que corresponde a um vetor que contém uma quantidade determinada de variáveis otimizáveis (genes). Assim, uma população representa a um grupo de soluções possíveis. Essas soluções serão avaliadas e ordenadas da melhor para a pior por meio de uma função objetivo. Esta função representa o *habitat* onde os indivíduos devem se adaptar, sendo, portanto, o único passo no algoritmo que determina como os cromossomos vão mudar ao longo do tempo. Parafraseando Kinnear [53], A função objetivo deve informar ao método computacional exatamente o que o usuário deseja otimizar, sendo a única chance que o usuário tem para representar suas intenções no poderoso algoritmo evolutivo.

Para a execução adequada do algoritmo, é necessário que sejam ajustados alguns parâmetros, sendo eles as probabilidades de permutação (isto é, qual a chance que cada indivíduo tem de participar de um cruzamento), probabilidades de mutação (responsáveis pela exploração de novos espaços de busca, introduzindo variabilidade genética na população), o tamanho da população e o número de iterações que serão realizadas. Para fins de exemplificação, na Figura 2.1 são ilustrados alguns tipos de permutação.

Figura 2.1 – Tipos de Permutação



Fonte: Próprio autor (2018).

A permutação de um ponto (a) é comumente utilizada por conta de sua simplicidade. É escolhido um ponto aleatório e, a partir deles, os genes trocam os segmentos depois do ponto de corte. Em (b) ocorre o análogo, mas com dois pontos de corte. No caso (c), cada gene tem uma probabilidade de sofrer permutação, enquanto em (d) as soluções filhas são geradas por médias (aritméticas ou ponderadas) da mescla das soluções mães.

### 2.3.3 Otimização por Enxame de Partículas

A Otimização por Enxame de Partículas (do inglês PSO – *Particle Swarm Optimization*) [54] – [58] aplica os conceitos de interação social, imitando o comportamento de um bando de pássaros ou um cardume de peixes na procura por alimento. Por meio desse algoritmo, cada indivíduo (que representa uma única solução) se relaciona com o bando (o conjunto completo de soluções) por meio da troca de informações sobre a disponibilidade de alimento (melhores regiões do espaço de busca da função objetivo).

Desse modo, o movimento de cada indivíduo é baseado em três componentes, sendo a primeira relacionada à sua velocidade na iteração anterior, o que indica que o algoritmo tem memória. O segundo termo refere-se à componente cognitiva do indivíduo, indicando que a tomada de decisão depende da sua própria experiência, isto é, o movimento ocorre em direção à melhor localização que ele conhece. Por fim, o último termo é a componente social, de modo que o bando todo se move em direção à melhor localização que qualquer indivíduo tenha localizado (i.e, o fato de um pássaro encontrar alimento em determinada região é suficiente para fazer com que todo o bando se desloque para este local).

Devido às suas vantagens, como a simplicidade do algoritmo e facilidade de implementação, o PSO é vastamente aplicado nas áreas biológica, médica e elétrica, por exemplo. Por outro lado, uma desvantagem do método original é que a convergência do algoritmo depende muito dos coeficientes das velocidades das partículas: se os valores forem elevados demais, os indivíduos podem ficar oscilando ao redor de um ponto de mínimo sem de fato atingi-lo. Todavia, se os coeficientes forem muito pequenos, o modelo demorará para encontrar a solução ótima. Diante desse empecilho, vários aprimoramentos foram desenvolvidos sobre o PSO, visando a otimizar as ponderações das velocidades e o peso de inércia, recalculando-os a cada iteração. Contudo, nessa dissertação utilizaremos a versão mais simples do algoritmo, a fim de reduzir o esforço computacional empregado.

### 2.3.4 Nelder-Mead Simplex

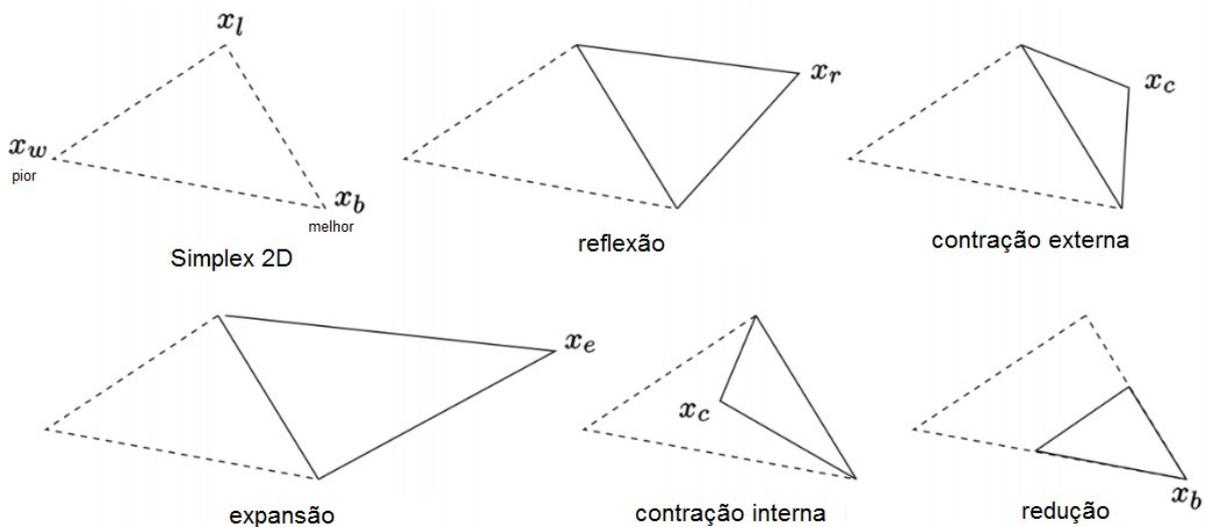
O método Simplex de Nelder-Mead [59] – [63] consiste de um mecanismo de busca direta, que parte de um Simplex inicial  $\{x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}\}$  em  $\mathbb{R}^n$  com  $n + 1$  vértices que exclui o pior vértice a cada iteração, substituindo-o por meio de reflexões, expansões, contrações ou reduções, visando à minimização da função objetivo.

Este método é bastante popular, especialmente nas áreas de química, engenharia química e medicina, devido à simplicidade de sua implementação computacional, a não necessidade do cálculo de quaisquer derivadas da função objetivo, a acentuada convergência da otimização nas primeiras iterações e o número reduzido de avaliações da função a cada iteração, sendo necessárias no máximo  $n + 2$  avaliações por iteração.

Como desvantagem, o Simplex não é muito eficiente, particularmente para problemas que tenham mais de dez variáveis: acima desse número, a convergência torna-se substancialmente mais difícil. Ademais, se a função for muito irregular, o método pode acabar convergindo para os mínimos locais, em detrimento do mínimo global.

As operações básicas utilizadas no algoritmo Nelder-Mead Simplex de reflexão, expansão, contração e redução são ilustradas na Figura 2.2 para um exemplo de função objetivo com duas variáveis ( $n = 2$ ).

Figura 2.2 – Operações realizadas no método Nelder-Mead Simplex para  $n = 2$



Fonte: J.R.R.A.Martins, 2012.

### 2.3.5 Considerações finais sobre os métodos

Na execução dos modelos propostos, são muito altas as probabilidades de o algoritmo encontrar um mínimo local, atingindo um ponto em que nenhum progresso é feito. Se isso acontecer, uma alternativa viável é recomençar o processo de otimização a partir de um ponto de partida diferente, visando localizar pontos de mínimo cada vez melhores. Ademais, a execução repetitiva do algoritmo computacional corrobora a robustez do método de avaliação e classificação, uma vez que resultados satisfatórias são encontradas em várias ocasiões.

## 3 Metodologia geral: Método de avaliação e classificação

### 3.1 Introdução

A metodologia geral desse trabalho é composta pelos seguintes elementos:

- a) o método geral de avaliação e classificação (que será descrito nesse Capítulo) capaz de prover uma nota numérica (quantitativa), de 0 (péssimo estado) a 1 (perfeito estado) e uma classificação simbólica (qualitativa); e
- b) o método de otimização (que será descrito no Capítulo 4) adaptado para encontrar valores ótimos ou quase-ótimos para as variáveis do método geral de avaliação e classificação, de forma a maximizar a assertividade dos resultados quando comparados a classificações fornecidas por analistas especializados.

Para viabilizar o emprego da metodologia geral, as seguintes informações são necessárias:

- a) para cada grandeza do método de análise, faixas que mapeiam seus valores em classificações simbólicas, adequadas para a observação isolada do respectivo parâmetro, as quais tipicamente são obtidas a partir de guias ou normas pré-existentes (por exemplo, [10] – [18]), bem como da experiência própria dos especialistas em manutenção; e
- b) um banco de dados de registros históricos de ensaios, em que cada registro contém os valores das grandezas consideradas na análise, bem como o conceito global  $c_g^e$  preparado pelos especialistas, com base em critérios estabelecidos em guias ou normas, considerando os valores de todas as grandezas.

Uma vez possuindo os elementos apresentados acima, o método de avaliação e classificação, que será descrito a seguir, consiste de:

- a) funções injetoras, que atribuem notas individuais – em uma escala contínua de 0 a 1 – e conceitos individuais simbólicos – em uma escala discreta – em função do mapeamento dos valores das grandezas. Destaca-se que o emprego

- de notas é uma análise quantitativa, permitindo a comparação rigorosa entre dois equipamentos que se encontram em situações muito semelhantes e a elaboração de ordens de prioridade precisas para planejamento de intervenções. Por outro lado, a utilização de conceitos, de caráter qualitativo, traduz uma visão geral, mais ampla, e de fácil interpretação do estado do equipamento; e
- b) um equacionamento para a obtenção de uma nota e um conceito global a partir das notas individuais, modelando uma expressão caracterizada como uma média ponderada. São aplicadas duas ponderações, sendo a primeira em função da grandeza ( $w_p$ ) e a segunda em função da nota individual que lhe foi atribuída ( $\lambda(s_p)$ ), conferindo não-linearidade à avaliação.

### 3.2 Modelo geral de avaliação e classificação

O método de avaliação e classificação tem, como entrada, as faixas que mapeiam as grandezas levadas em consideração em suas respectivas classificações simbólicas individuais, definidas quando cada grandeza é analisada separadamente. A Tabela 3.1 apresenta a forma geral dessas entradas. Nesta tabela, tem-se que:

- a)  $v_p$  é o valor atribuído à  $p$ -ésima grandeza do método, sendo  $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ;
- b)  $v_p^{q,(i)}$  é o  $i$ -ésimo limite, sendo  $i \in \{0, 1, 2, \dots, V - 1, V\}$ , correspondente ao  $q$ -ésimo valor do parâmetro, com  $q \in \{1, 2, \dots, Q\}$ , da  $p$ -ésima grandeza; e
- c)  $c_p^{(i)}$  é a classificação individual simbólica da  $p$ -ésima grandeza atribuída à faixa correspondente.

No método proposto, visando a classificações mais condizentes com o que é considerado em casos reais, contempla-se a possibilidade de existirem grandezas que dependem de outros parâmetros. Por exemplo, em uma análise físico-química, sabe-se que a definição das faixas de classificação quanto à rigidez dielétrica do óleo isolante depende da maior tensão nominal do transformador de potência, visto que tensões maiores exigem avaliações mais rigorosas quanto a este aspecto. Se forem consideradas três faixas de tensão, por exemplo, ter-se-ão três tabelas de classificação, uma para cada valor de  $q \in \{1, 2, 3\}$ . Assim, para a análise de um caso específico, deve-se adotar a tabela que corresponde à maior tensão nominal do equipamento em questão. Vale ressaltar que há duas possibilidades de

mapeamento, sendo a primeira utilizada para grandezas  $p$  cujos  $v_p^{q(i)}$  são crescentes com o aumento de  $i$  (caso 1) e a segunda para as grandezas cujos  $v_p^{q(i)}$  são decrescentes (caso 2).

Tabela 3.1 – Forma geral do mapeamento entre faixas de valores e classificações

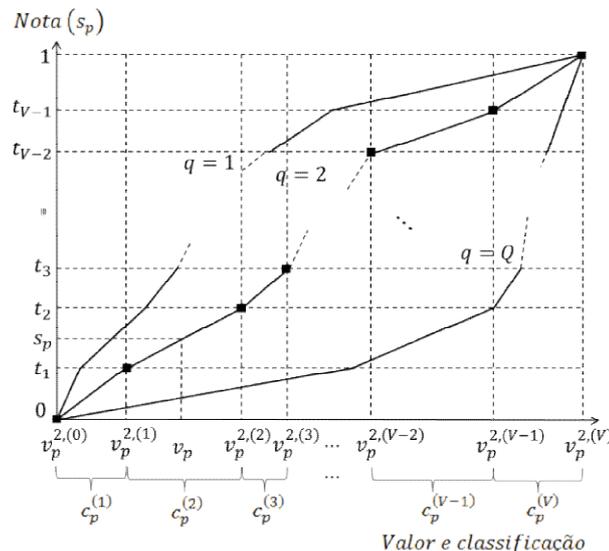
Faixa de valores (caso 1)	Faixa de valores (caso 2)	Classificação
$v_p^{q,(V-1)} \leq v_p \leq v_p^{q,(V)}$	$v_p^{q,(V)} \leq v_p \leq v_p^{q,(V-1)}$	$c_p^{(V)}$
$v_p^{q,(V-2)} \leq v_p < v_p^{q,(V-1)}$	$v_p^{q,(V-1)} < v_p \leq v_p^{q,(V-2)}$	$c_p^{(V-1)}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$v_p^{q,(2)} \leq v_p < v_p^{q,(3)}$	$v_p^{q,(3)} < v_p \leq v_p^{q,(2)}$	$c_p^{(3)}$
$v_p^{q,(1)} \leq v_p < v_p^{q,(2)}$	$v_p^{q,(2)} < v_p \leq v_p^{q,(1)}$	$c_p^{(2)}$
$v_p^{q,(0)} \leq v_p < v_p^{q,(1)}$	$v_p^{q,(1)} < v_p \leq v_p^{q,(0)}$	$c_p^{(1)}$

Fonte: Próprio autor (2018).

O valor de cada grandeza de análise é mapeado em notas aplicando-se funções injetoras contínuas, expressas por funções com forma linear por partes, de tal maneira que dois valores distintos de uma mesma grandeza recebam duas notas distintas, por mais próximos que sejam esses valores, mesmo que apresentem classificações individuais simbólicas iguais.

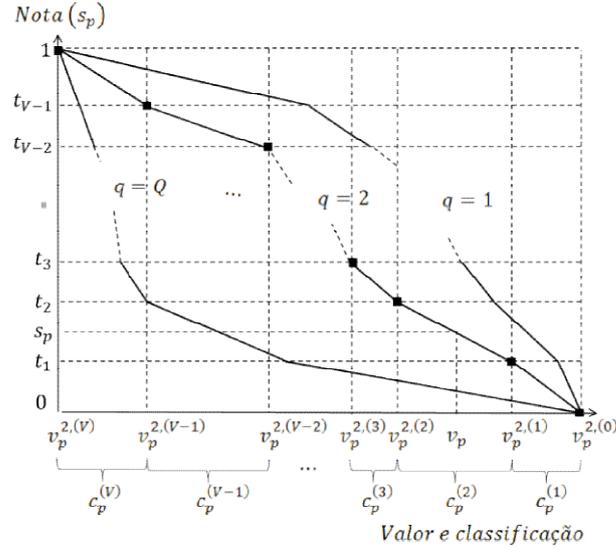
Na Figura 3.1, ilustra-se a correspondência entre valor  $v_p$  da grandeza, o conceito individual simbólico  $c_p$  e a respectiva nota,  $s_p$ , a qual é obtida, nesta proposta, por meio de interpolação linear simples. Por outro lado, a correspondência entre  $c_p$  e  $s_p$  é ilustrada na Tabela 3.2, válida tanto para o caso 1 quanto para o caso 2.

Figura 3.1 – Funções injetoras para mapeamento de valor da grandeza para nota



(a) caso 1

Figura 3.1 – Funções injetoras para mapeamento de valor da grandeza para nota (continuação)



(b) caso 2

Fonte: próprio autor (2018).

Tabela 3.2 – Forma geral do mapeamento entre classificações e notas individuais

Classificação Individual	Nota Individual
$c_p^{(V)}$	$t_{V-1} \leq s_p \leq 1,00$
$c_p^{(V-1)}$	$t_{V-2} \leq s_p < t_{V-1}$
$\vdots$	$\vdots$
$c_p^{(3)}$	$t_2 \leq s_p < t_3$
$c_p^{(2)}$	$t_1 \leq s_p < t_2$
$c_p^{(1)}$	$0,00 \leq s_p < t_1$

Fonte: Próprio autor (2018).

Com base nos parâmetros  $v_p^{q,(i)}$  e  $t_i$ , a nota individual  $s_p$  correspondente à leitura  $v_p$  será calculada com base nas equações (3.1) ou (3.2), sendo (3.1) aplicável para as grandezas do caso 1 e (3.2) aplicável para grandezas do caso 2. Ainda, os parâmetros  $v_p^{q,(i)}$  e  $t_i$  utilizados nessas equações devem ser escolhidos em conformidade com a classificação  $c_p^{(i)}$ , referente à faixa de valores que contém a leitura  $v_p$ .

$$s_p(v_p; \mathbf{v}_p^q, \mathbf{t}) = t_{i-1} + \frac{v_p - v_p^{q,(i-1)}}{v_p^{q,(i)} - v_p^{q,(i-1)}} \cdot (t_i - t_{i-1}), \text{ para } v_p^{q,(i-1)} \leq v_p < v_p^{q,(i)} \quad (3.1)$$

$$s_p(v_p; \mathbf{v}_p^q, \mathbf{t}) = t_i - \frac{v_p - v_p^{q,(i)}}{v_p^{q,(i-1)} - v_p^{q,(i)}} \cdot (t_i - t_{i-1}), \text{ para } v_p^{q,(i)} < v_p \leq v_p^{q,(i-1)} \quad (3.2)$$

Deve-se notar que, para o mapeamento efetivo, é necessário adotar valores adequados para o vetor dos limites das notas,  $\mathbf{t} = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{V-1}, t_V\}$  de acordo com (3.3), os quais,

para efeito de padronização, serão igualmente aplicados para todas as grandezas nesta proposta. Observa-se que, independentemente do caso,  $t$  será sempre crescente.

Os valores  $t_0 = 0,00$  e  $t_V = 1,00$  tratam-se dos limites mínimo e máximo, respectivamente, para a nota individual. Assim, se, por acaso, uma grandeza apresentar valores fora das faixas delimitadas na Tabela 3.1, deverá obrigatoriamente receber nota individual igual a 1,00 quando  $v_p$  extrapolar  $v_p^{q,(V)}$  e nota 0,00 quando  $v_p$  extrapolar  $v_p^{q,(0)}$ .

$$0,00 < t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_{V-2} < t_{V-1} < 1,00 \quad (3.3)$$

Obtendo-se as notas de todas as grandezas de análise, aplica-se então a equação (3.4), de forma a obter uma nota global,  $s_g$ .

$$s_g = \frac{\sum_{p=1}^P w_p \cdot \lambda(s_p) \cdot s_p}{\sum_{p=1}^P w_p \cdot \lambda(s_p)} \quad (3.4)$$

Na equação (3.4), tem-se que:

- a) o valor  $w_p > 0$  é o peso que corresponde unicamente à importância da  $p$ -ésima grandeza na composição da nota global. Assim, as grandezas que têm maior impacto na avaliação de transformadores recebem ponderações maiores. Ressalta-se a necessidade de se normalizar o somatório dos valores de  $w$  de acordo com (3.5).

$$\sum_{p=1}^P w_p = 1,00 \quad (3.5)$$

- b) a segunda ponderação  $\lambda(s_p)$  segue a equação (3.6), a qual deve expressar que as melhores notas individuais, relacionadas a grandezas em bom estado, são associadas a pesos consideravelmente menores do que as notas atribuídas a grandezas em mau estado. Logo, notas ruins implicam em pesos maiores e, conseqüentemente, maiores impactos quando é efetuada a composição da nota global.

$$\lambda(s_p) = C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot s_p} + C_3 \quad (3.6)$$

A expressão (3.6) foi modelada em uma equação do tipo exponencial, em decorrência de sua aplicabilidade na modelagem de fenômenos naturais. Ela decresce com o aumento da nota  $s_p$  quando  $C_1 > 0$  e  $C_2 > 0$ , resultando em uma majoração de notas ruins. Ressalta-se

que os valores dos seus parâmetros ( $C_1, C_2, C_3$ ) devem ser adequadamente dimensionados para resultar em notas globais  $s_g$  apropriadas.

Para evitar que o modelo retorne resultados indesejados por consequência de mau dimensionamento dos parâmetros  $C_1, C_2, C_3$ , foi desenvolvido nessa dissertação um equacionamento para redução de variáveis e aplicação de condições de contorno adequadas. Como ponto de partida, sejam as restrições (3.7):

$$\begin{aligned} C_1 &> 0 \\ C_2 &> 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

A primeira e a segunda condições de (3.7) juntas impõem que a função  $\lambda(s_p)$  seja estritamente decrescente, ou seja, máxima para nota 0 e mínima para nota 1. Reduziremos o número de variáveis otimizáveis dessa equação por meio da condição adicional (3.8):

$$\lambda(1) = 1 \quad (3.8)$$

Sabendo que as notas podem variar somente dentro do intervalo fechado  $0 \leq s_p \leq 1$  e, observando que a função  $\lambda(s_p)$  apresentada em (3.6) é estritamente decrescente (por consequência do expoente negativo), conclui-se a partir da condição (3.8) que o valor mínimo que  $\lambda(s_p)$  pode assumir é igual à unidade, ou seja,  $\lambda(s_p) \geq 1$ . Assim, (3.6) está normalizada.

Substituindo (3.8) em (3.6) a fim de reduzi-la em uma variável, obtém-se em (3.9) o valor de  $C_3$  em função de  $C_1$  e  $C_2$ :

$$\begin{aligned} C_1 \cdot e^{-C_2} + C_3 &= 1 \\ C_3 &= 1 - C_1 \cdot e^{-C_2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Aplicando (3.9) em (3.6), tem-se em (3.10) a equação reduzida:

$$\begin{aligned} \lambda(s_p) &= C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot s_p} + 1 - C_1 \cdot e^{-C_2} \\ \lambda(s_p) &= C_1 \cdot (e^{-C_2 \cdot s_p} - e^{-C_2}) + 1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

O próximo passo refere-se à normalização dos valores de  $C_1$  e  $C_2$ , visto que as variáveis de uma função exponencial podem divergir na otimização se não houver condições de contorno adequadas. Para isso, são estabelecidos os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} \lambda_M &= \text{Valor máximo admissível da função; e} \\ k_M &= \text{Valor máximo admissível do expoente.} \end{aligned}$$

Limitando os valores da amplitude e do expoente, funções de transformação podem ser utilizadas para que as variáveis otimizáveis estejam dentro do intervalo fechado e

normalizado  $[0,1]$ . Nesse trabalho serão utilizadas as variáveis  $E_1$  e  $E_2$ , obedecendo às condições em (3.11).

$$E_1, E_2 \in [0,1] \quad (3.11)$$

Sabendo que  $C_2 \in [0, k_M]$  e  $E_2 \in [0,1]$ , tem-se em (3.12) a relação entre  $C_2$  e  $E_2$ :

$$C_2 = k_M \cdot E_2 \quad (3.12)$$

Para encontrar a relação entre  $C_1$  e  $E_1$ , é necessário observar o comportamento da função (3.6) no ponto  $s_p = 0$ :

$$\lambda(0) = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2}) + 1 \quad (3.13)$$

Substituindo (3.12) em (3.13):

$$\lambda(0) = C_1 \cdot (1 - e^{-k_M \cdot E_2}) + 1 \quad (3.14)$$

O valor máximo de (3.14) ocorrerá quando o valor de  $C_1$  for máximo e o valor dentro dos parênteses também for máximo. Nesse caso particular, podemos afirmar que  $\lambda_{MAX}(0) = \lambda_M$ . Aplicando-o em (3.14), tem-se o valor de  $C_1$  máximo como resultado em (3.15).

$$\lambda_{MAX}(0) = C_{1,MAX} \cdot (1 - e^{-k_M \cdot E_{2,MAX}}) + 1$$

$$\lambda_M = C_{1,MAX} \cdot (1 - e^{-k_M \cdot 1}) + 1$$

$$C_{1,MAX} = \frac{\lambda_M - 1}{1 - e^{-k_M}} \quad (3.15)$$

Sabendo o valor máximo de  $C_1$  e considerando as condições previstas em (3.7), tem-se a relação entre  $C_1$  e  $E_1$  em (3.16):

$$C_1 = \frac{\lambda_M - 1}{1 - e^{-k_M}} E_1 \quad (3.16)$$

Substituindo (3.12) e (3.16) em (3.10), obtém-se em (3.17) a equação de  $\lambda(s_p)$  como função de dois parâmetros otimizáveis ( $E_1, E_2$ ) normalizados dentro do intervalo  $[0,1]$ . Ressalta-se que a redução de um parâmetro em (3.17) contribuiu fortemente para a obtenção de resultados mais assertivos, sendo um aprimoramento essencial da SDPN.

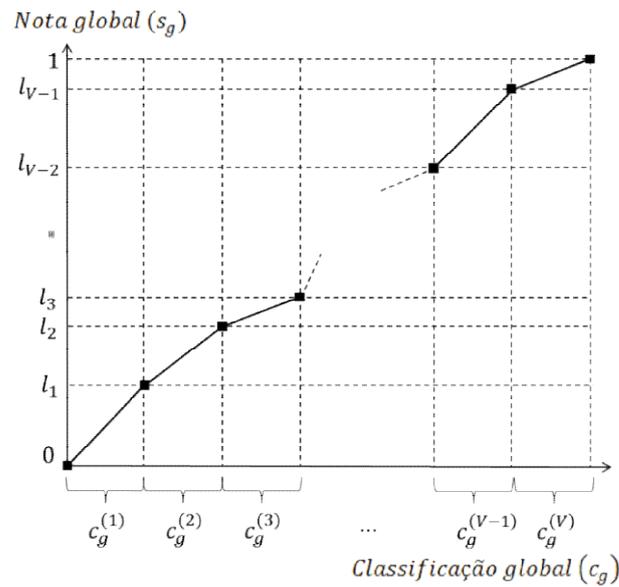
$$\lambda(s_p) = \frac{\lambda_M - 1}{1 - e^{-k_M}} \cdot E_1 \cdot (e^{-k_M \cdot E_2 \cdot s_p} - e^{-k_M \cdot E_2}) + 1 \quad (3.17)$$

Por fim, a nota global é mapeada para a classificação global, conforme a Figura 3.2 e a Tabela 3.3, mediante a utilização de valores adequados para o vetor  $\mathbf{l} = \{l_0, l_1, l_2, \dots, l_{V-1}, l_V\}$ , os quais delimitam as classificações globais em função das notas. A seguinte condição deve ser obedecida, de modo que  $\mathbf{l}$  esteja sempre em ordem crescente:

$$0,00 < l_1 < l_2 < l_3 < \dots < l_{V-2} < l_{V-1} < 1,00 \quad (3.18)$$

Em (3.18) os valores  $l_0 = 0,00$  e  $l_V = 1,00$  funcionam como limites mínimo e máximo, respectivamente para a nota global. Além disso, é recomendável que o modelo apresente a quantidade de conceitos individuais igual à quantidade de conceitos globais, a fim de viabilizar comparações e padronizar nomenclaturas, facilitando a compreensão e a interpretação dos resultados apresentados pelo método. Portanto,  $\mathbf{l}$  contém  $V - 1$  parâmetros otimizáveis, de modo análogo ao que acontece com  $\mathbf{t}$ .

Figura 3.2 – Mapeamento de nota global para classificação global



Fonte: Próprio autor (2018).

Tabela 3.3 – Forma geral do mapeamento de nota global para classificação global

Nota Global	Classificação Global
$l_{V-1} \leq s_g \leq 1,00$	$c_g^{(V)}$
$l_{V-2} \leq s_g < l_{V-1}$	$c_g^{(V-1)}$
$\vdots$	$\vdots$
$l_2 \leq s_g < l_3$	$c_g^{(3)}$
$l_1 \leq s_g < l_2$	$c_g^{(2)}$
$0,00 \leq s_g < l_1$	$c_g^{(1)}$

Fonte: Próprio autor (2018).

### 3.3 Aplicação do modelo aos ensaios físico-químicos

Nessa seção será discutida a aplicação do modelo geral de avaliação aos resultados dos principais ensaios físico-químicos realizados em óleo mineral isolante de transformadores de potência, de acordo com a subdivisão dos parâmetros abaixo, descritos a seguir.

- a) Parâmetros de entrada do modelo de avaliação e classificação; e
- b) Parâmetros otimizáveis.

#### 3.3.1 Parâmetros de entrada

Sejam os  $P = 6$  principais ensaios físico-químicos realizados em óleo mineral isolante de transformadores de potência discriminados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Discriminação das grandezas físico-químicas

Índice	Grandeza	Símbolo
$p = 1$	Tensão interfacial	$TI$
$p = 2$	Índice de neutralização	$IN$
$p = 3$	Índice de cor	$IC$
$p = 4$	Rigidez dielétrica	$RD$
$p = 5$	Teor de água	$TA$
$p = 6$	Fator de potência	$FP$

Fonte: Próprio autor (2018).

Nessa dissertação, foram usadas  $V = 5$  faixas de classificações simbólicas na aplicação do modelo aos ensaios físico-químicos, apresentando a correspondência entre símbolo e classificações individual e global, do melhor para o pior conceito na Quadro 3.2.

Ademais, foi considerada a influência da tensão nominal no nível de exigência das grandezas, visto que equipamentos de tensões maiores necessitam de avaliações mais rigorosas quanto à rigidez dielétrica e ao teor de água, por exemplo. Com base nesse aspecto, foram consideradas as faixas de tensão nominal  $V_N$  do transformador (que corresponde à sua maior tensão nominal) discriminadas no Quadro 3.3.

Para o mapeamento das grandezas em classificações individuais, foram empregados os resultados da pesquisa bibliográfica desenvolvida no Capítulo 2. Assim, constatou-se que as tabelas de limites de grandezas apresentadas em [25], em razão de sua padronização (5 faixas)

e dos resultados atingidos no projeto de pesquisa, mostraram-se adequadas para o desenvolvimento dessa dissertação. Na Tabela 3.4 são mostrados os  $v_p^q$  aplicados no modelo, que se encontram em conformidade com valores preconizados em guias internacionais ([13], [17]) e normas nacionais ([10], [16]).

Quadro 3.2 – Correspondência entre símbolos e classificações individuais e globais

Classificação Individual	Classificação Global	Símbolo
$c_p^{(5)}$	$c_g^{(5)}$	A (Excelente)
$c_p^{(4)}$	$c_g^{(4)}$	B (Bom)
$c_p^{(3)}$	$c_g^{(3)}$	C (Marginal)
$c_p^{(2)}$	$c_g^{(2)}$	D (Ruim)
$c_p^{(1)}$	$c_g^{(1)}$	E (Péssimo)

Fonte: Próprio autor (2018).

Quadro 3.3 – Discriminação das faixas de tensão nominal consideradas na avaliação

Índice	Faixa de valores de $V_N$
$q = 1$	$V_N \leq 34,5 \text{ kV}$
$q = 2$	$34,5 \text{ kV} < V_N < 138 \text{ kV}$
$q = 3$	$V_N \geq 138 \text{ kV}$

Fonte: Próprio autor (2018).

Tabela 3.4 – Limites das grandezas aplicados no método de análise

Grandeza	Limites $v_p^q$	Caso
$TI$	$v_1^1 = [ 0 \quad 18 \quad 24 \quad 27 \quad 40 \quad 50 ]$	caso 1
$IN$	$v_2^1 = [ 2,00 \quad 0,40 \quad 0,15 \quad 0,10 \quad 0,03 \quad 0,01 ]$	caso 2
$IC$	$v_3^1 = [ 8,5 \quad 5,5 \quad 4,0 \quad 2,5 \quad 1,0 \quad 0,0 ]$	caso 2
$RD$	$v_4^1 = [ 0 \quad 35 \quad 45 \quad 60 \quad 75 \quad 100 ]$	caso 1
	$v_4^2 = [ 0 \quad 40 \quad 50 \quad 65 \quad 80 \quad 100 ]$	
$TA$	$v_5^1 = [ 100 \quad 45 \quad 35 \quad 25 \quad 15 \quad 0 ]$	caso 2
	$v_5^2 = [ 100 \quad 40 \quad 30 \quad 20 \quad 10 \quad 0 ]$	
	$v_5^3 = [ 100 \quad 35 \quad 25 \quad 15 \quad 5 \quad 0 ]$	
$FP$	$v_6^1 = [ 30,0 \quad 4,0 \quad 2,5 \quad 1,0 \quad 0,3 \quad 0,0 ]$	caso 2

Fonte: Próprio autor (2018).

Vale salientar que, nessa dissertação, todas as grandezas são apresentadas nas unidades de medida indicadas no Quadro 3.4, bem como são provenientes de resultados de

ensaios realizados rigorosamente por meio dos métodos relacionados também no Quadro 3.4, conforme a NTC-36 [16].

Quadro 3.4 – Métodos de ensaio para a medição das grandezas

Grandeza	Unidade	Método de Ensaio
Tensão interfacial	mN/m	ABNT NBR 6234
Índice de neutralização	mg KOH	ABNT NBR 14248
Índice de cor	–	ABNT NBR 14483
Rigidez dielétrica	kV	ABNT NBR IEC 60156
Teor de água	ppm	ABNT NBR 10710
Fator de potência	(%)	ABNT NBR 12133

Fonte: Norma Técnica CELG (2016).

### 3.3.2 Parâmetros otimizáveis

O método apresenta os seguintes parâmetros otimizáveis<sup>4</sup>, enumerados a seguir:

- a) Limites da classificação individual;
- b) Pesos em função da grandeza;
- c) Constantes da equação exponencial; e
- d) Limites da classificação global.

#### 3.3.2.1 Limites da classificação individual

Considerando  $V = 5$ , há quatro limites otimizáveis no vetor  $\mathbf{t}$ , sendo eles:

$$\begin{aligned}
 t_{AB} &= \text{Limite de nota entre os conceitos individuais "A" e "B"}; \\
 t_{BC} &= \text{Limite de nota entre os conceitos individuais "B" e "C"}; \\
 t_{CD} &= \text{Limite de nota entre os conceitos individuais "C" e "D"}; \text{ e} \\
 t_{DE} &= \text{Limite de nota entre os conceitos individuais "D" e "E"}.
 \end{aligned}$$

Que são restritos às condições ilustradas em (3.19) – provenientes da aplicação de (3.3) para o caso  $V = 5$  –, de modo que as funções injetoras sejam estritamente crescentes para o caso 1 (ou estritamente decrescentes para o caso 2).

<sup>4</sup> A partir desse momento, que se trata da aplicação do modelo à avaliação de resultados de ensaios físico-químicos em transformadores de potência, mudaremos a nomenclatura dos índices dos vetores otimizáveis (substituindo o contador pelo seu respectivo símbolo) para facilitar a interpretação dos resultados obtidos no desenvolvimento dessa dissertação.

$$0,00 < t_{DE} < t_{CD} < t_{BC} < t_{AB} < 1,00 \quad (3.19)$$

### 3.3.2.2 Pesos em função da grandeza

No escopo deste trabalho, que se refere ao caso dos ensaios físico-químicos, têm-se os seguintes pesos otimizáveis:

$w_{TI}$	=	Peso da tensão interfacial;
$w_{IN}$	=	Peso do índice de neutralização;
$w_{IC}$	=	Peso do índice de cor;
$w_{RD}$	=	Peso da rigidez dielétrica;
$w_{TA}$	=	Peso do teor de água; e
$w_{FP}$	=	Peso do fator de potência.

A condição necessária para a aplicação do método é que a soma dos elementos de  $w$  seja igual à unidade, conforme equação (3.20) – proveniente de (3.5) para o caso  $P = 6$ .

$$w_{TI} + w_{IN} + w_{IC} + w_{RD} + w_{TA} + w_{FP} = 1,00 \quad (3.20)$$

### 3.3.2.3 Constantes da equação exponencial

De maneira idêntica ao modelo geral, seja a equação exponencial (3.17) ao caso específico dos ensaios físico-químicos:

$$\lambda(s_p) = \frac{\lambda_M - 1}{1 - e^{-k_M}} \cdot E_1 \cdot (e^{-k_M \cdot E_2 \cdot s_p} - e^{-k_M \cdot E_2}) + 1$$

Esta equação apresenta duas variáveis otimizáveis ( $E_1, E_2$ ), que devem satisfazer às condições ilustradas em (3.11):

$$E_1, E_2 \in [0,1]$$

Note que há ainda em (3.17) dois parâmetros de otimização ( $\lambda_M, k_M$ ) a serem definidos. Para os fins da aplicação nos ensaios físico-químicos, utilizaremos  $\lambda_M = 12$  e  $k_M = 4$ , que permitem uma boa amplitude da função  $\lambda(s_p)$  e ao mesmo tempo impedem que a curva exponencial seja demasiada íngreme, o que comprometeria a proposta do modelo de atribuir pesos gradualmente mais elevados a notas ruins.

### 3.3.2.4 Limites da classificação global

O último conjunto de parâmetros consiste do vetor  $\mathbf{l}$ , composto pelos elementos:

$$\begin{aligned} l_{AB} &= \text{Limite de nota entre os conceitos finais "A" e "B"}; \\ l_{BC} &= \text{Limite de nota entre os conceitos finais "B" e "C"}; \\ l_{CD} &= \text{Limite de nota entre os conceitos finais "C" e "D"}; \text{ e} \\ l_{DE} &= \text{Limite de nota entre os conceitos finais "D" e "E"}. \end{aligned}$$

Estes valores são restritos às condições ilustradas em (3.21), que se trata de uma aplicação de (3.18) ao caso particular  $V = 5$ :

$$0,00 < l_{DE} < l_{CD} < l_{BC} < l_{AB} < 1,00 \quad (3.21)$$

De posse de  $\mathbf{l}$ , são, finalmente, definidas as faixas de classificação para a obtenção do conceito global,  $c_g^c$ , a partir da nota global,  $s_g$ , calculada por meio da equação (3.4). Outrossim, em função dos resultados dos ensaios físico-químicos, são propostas ações recomendadas [25] para auxiliar os engenheiros responsáveis na tomada de decisão referente aos equipamentos, conforme Quadro 3.5.

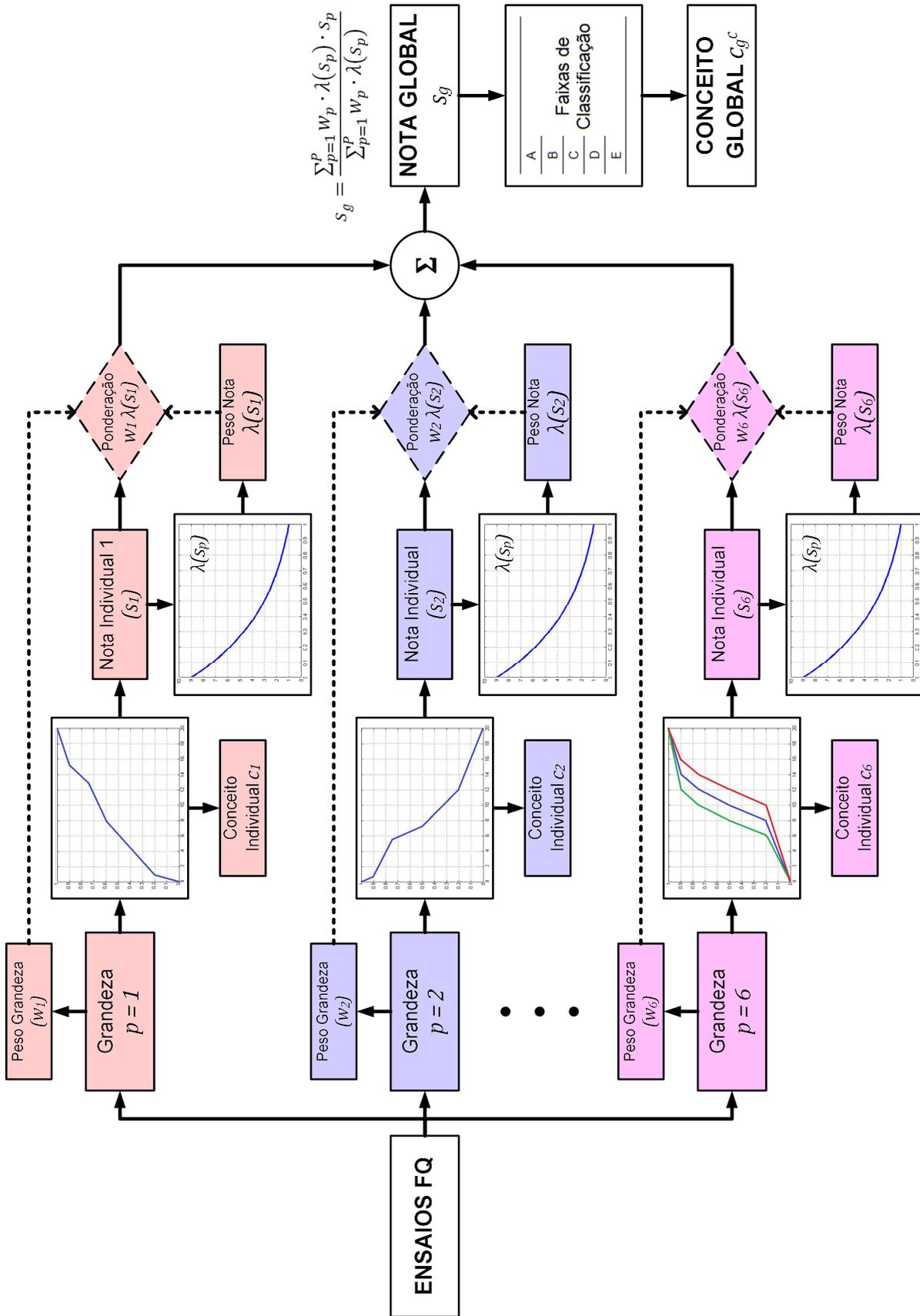
Quadro 3.5 – Critérios para a obtenção do Conceito Global e ações recomendadas

Conceito Global ( $c_g^c$ )	Nota Global ( $s_g$ )	Ações Recomendadas
A (excelente)	$l_{AB} \leq s_g \leq 1,00$	Continuar a operar o equipamento normalmente
B (bom)	$l_{BC} \leq s_g < l_{AB}$	Continuar a operar o equipamento, estando atento à evolução de resultados nos próximos registros
C (marginal)	$l_{CD} \leq s_g < l_{BC}$	Investigar e realizar outros ensaios em curto prazo para confirmar resultados e tendências
D (ruim)	$l_{DE} \leq s_g < l_{CD}$	Programar retirada do equipamento de operação para inspeção interna, localização e correção de defeito
E (péssimo)	$0,00 \leq s_g < l_{DE}$	Retirar o equipamento de operação em caráter de emergência para inspeção interna, localização e correção de defeito

Fonte: Próprio autor (2018).

Na Figura 3.3 (adaptada de [31]) é recapitulada a aplicação do método geral de avaliação e classificação aos resultados de ensaios físico-químicos em transformadores de potência por meio de um fluxograma.

Figura 3.3 – Fluxograma da aplicação do método de avaliação a ensaios físico-químicos



Fonte: Adaptado de N.K. Moura (2016).

## 4 Metodologia Geral: Método de Otimização

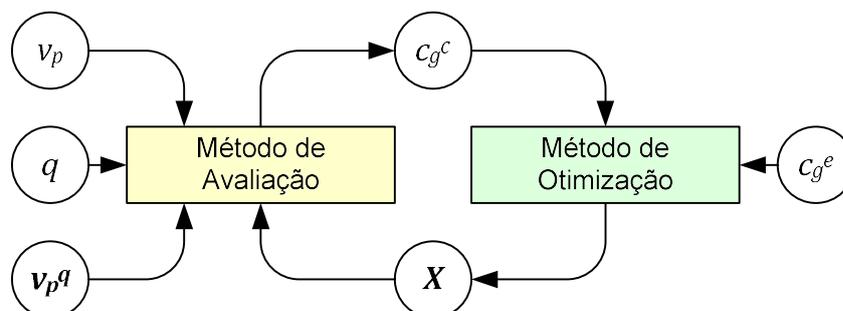
### 4.1 Introdução

O método de otimização computacional empregado nesse trabalho consiste da aplicação das técnicas *Hill Climbing*, Algoritmo evolutivo, Nelder-Mead Simplex e Otimização por enxame de partículas, visando à obtenção dos valores ótimos ou quase-ótimos dos elementos do método de avaliação e classificação, em que as avaliações foram feitas por meio de comparações com registros da base de dados reais.

Este método recebe como entrada o banco de dados de registros históricos de ensaios, em que cada registro contém os conceitos globais  $c_g^e$  preparados pelos especialistas; bem como os conceitos globais  $c_g^c$  calculados conforme metodologia descrita no Capítulo 3. Outrossim, ele realimenta o método de avaliação e classificação, fornecendo-lhe os valores das variáveis otimizáveis, que serão representadas doravante por meio do vetor  $\mathbf{X} = \{t, w, E, l\}$ .

Deste modo, embora sejam tratados em capítulos diferentes nessa dissertação, observa-se que os dois métodos que compõem a metodologia geral estão intimamente relacionados, uma vez que a execução de um método depende do cálculo das variáveis obtidas por meio do outro método e vice-versa. Esse ciclo de interdependência, ilustrado na Figura 4.1, se repete até que a comparação entre  $c_g^c$  e  $c_g^e$  apresente a menor diferença possível. Sob essas condições, considera-se que os valores de  $\mathbf{X}$  são satisfatórios.

Figura 4.1 – Ciclo de interdependência entre os métodos de avaliação e otimização

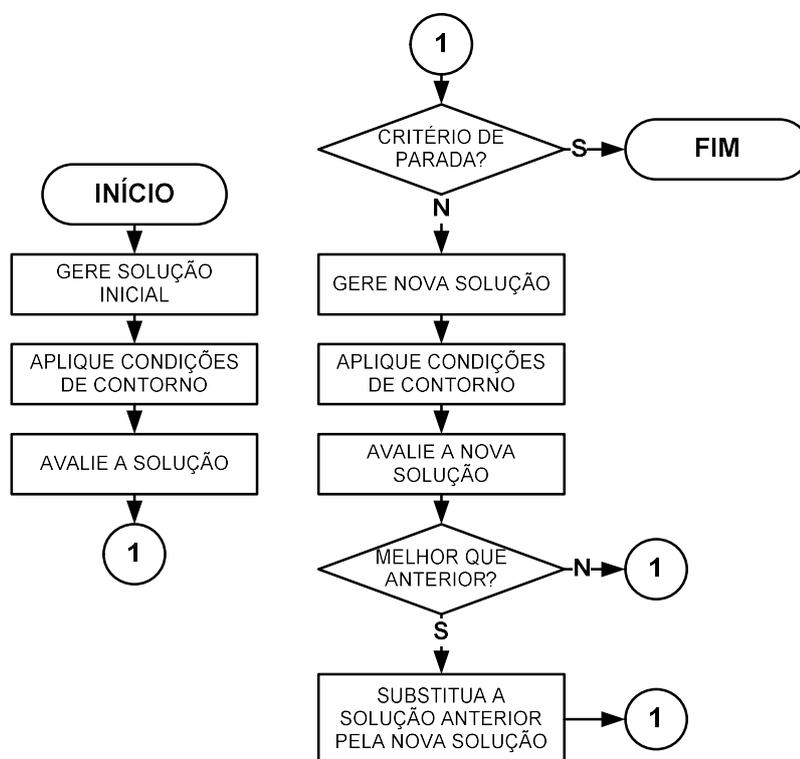


Fonte: Próprio autor (2018).

## 4.2 Estrutura do algoritmo de otimização

O algoritmo de otimização consiste de dois elementos principais: a inicialização e o laço de repetição. Na inicialização é definido o ponto de partida, para que dentro do laço a solução seja recalculada e avaliada inúmeras vezes, visando à minimização de uma determinada função objetivo. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.2 e detalhado nas subseções 4.2.1 a 4.2.4.

Figura 4.2 – Fluxograma da estrutura do algoritmo de otimização



Fonte: Próprio autor (2018).

### 4.2.1 Obtenção da solução inicial

A solução inicial do modelo é composta por valores aleatórios provenientes de uma distribuição estatística uniforme dentro do intervalo  $[0,1]$ , conforme o Pseudocódigo 4.1. Desse modo, cada execução do algoritmo de otimização terá seu próprio ponto de partida, possibilitando o mapeamento de diferentes áreas do gráfico da função objetivo.

Portanto, ao executar o método inúmeras vezes, podem ser encontrados mínimos locais cada vez melhores, ou, eventualmente, o mínimo global. De qualquer modo, na pior das

hipóteses haverá pelo menos um mínimo local cuja solução (quase-ótima) seja satisfatória e aplicável ao problema proposto.

Vale ressaltar que a execução exaustiva do algoritmo é fundamentalmente necessária, uma vez que o método de avaliação provê uma função não-linear de extrema complexidade em um espaço  $n$ -dimensional para o cálculo de  $c_g^c$ , apresentando inúmeros pontos de mínimo locais.

#### Pseudocódigo 4.1 – geraSoluçãoInicial

---

**Entradas:**

$n_{soluções}$  (número de soluções a serem geradas),

**Saídas:**

$X$  (solução inicial do modelo).

**Começo**

**defina**  $V, P$ ; (número de faixas e número de grandezas).

$n_{elementos} \leftarrow 2V + P + 4$  (número de elementos de cada solução).

**para**  $i = 1$  **até**  $n_{soluções}$  **faça**

**para**  $j = 1$  **até**  $n_{elementos}$  **faça**

$X(i, j) \leftarrow U(0,1)$ ; (valores aleatórios de uma distribuição uniforme entre 0 e 1)

**fim**

**fim**

**retorne**  $X$ ;

**fim**

---

Fonte: Próprio autor (2018).

### 4.2.2 Condições de contorno

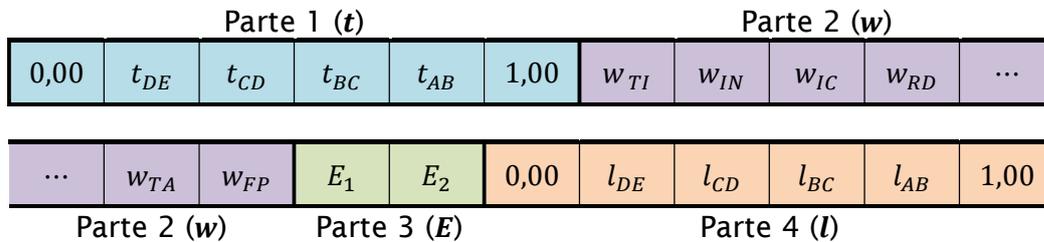
Conforme descrito no Capítulo 3, a variável otimizável  $\mathbf{X}$  deve satisfazer às condições de contorno previstas nas equações (3.3), (3.5), (3.11) e (3.18). Assim, o Pseudocódigo 4.2 tem como objetivo transformar uma solução arbitrária  $\mathbf{X}$  em uma solução adequada e corrigida  $\mathbf{X}_c$  que possa ser utilizada no método de avaliação. Esse pseudocódigo deve ser executado a cada vez que forem geradas novas soluções, para garantir que elas estejam em conformidade com as condições de contorno.

Ainda no Pseudocódigo 4.2, são utilizadas as funções *desagrupa* e *agrupa*, que se destinam a separar e unificar, respectivamente, os vetores  $\mathbf{t}, \mathbf{w}, \mathbf{E}, \mathbf{l}$  em relação à variável completa,  $\mathbf{X}$ , por meio de sua divisão em quatro partes distintas. No caso específico da aplicação do método aos ensaios físico-químicos, essa divisão ocorre conforme ilustrado na Figura 4.3, por meio do mapeamento executado no Pseudocódigo 4.3. O procedimento inverso ocorre conforme o Pseudocódigo 4.4.

## Pseudocódigo 4.2 – condições Contorno

**Entradas:** $X$  (solução inicial do modelo).**Saídas:** $X_c$  (solução corrigida do modelo).**começo****para**  $i = 1$  **até**  $n_{\text{soluções}}$  **faça** $(t, w, E, l) \leftarrow \text{desagrupa}(X(i));$  $t \leftarrow \text{crescente}(t);$  (ordenação dos elementos do menor ao maior) $t \leftarrow (t - \min(t)) / (\max(t) - \min(t));$  (normalização de  $t$ ) $w \leftarrow \text{módulo}(w) / \text{soma}(w);$  (normalização dos elementos de  $w$ )**se**  $E < 0$  **então** (condição para que os elementos de  $E$  permaneçam entre 0 e 1) $E \leftarrow 0;$ **caso contrário****se**  $E > 1$  **então** $E \leftarrow 1;$ **fim****fim** $l \leftarrow \text{crescente}(l);$  (ordenação dos elementos do menor ao maior) $l \leftarrow (l - \min(l)) / (\max(l) - \min(l));$  (normalização de  $l$ ) $(X_c(i)) \leftarrow \text{agrupa}(t, w, E, l);$ **fim****fim****retorne**  $X_c;$ **fim**

Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 4.3 – Divisão da variável  $X$  em quatro partes distintas

Fonte: Próprio autor (2018).

## Pseudocódigo 4.3 – desagrupa

**Entradas:** $X$  (variável completa).**Saídas:** $(t, w, E, l)$  (vetores).**Começo****defina**  $V, P;$  (número de faixas e número de grandezas) $t \leftarrow X(1 : V + 1);$  $w \leftarrow X(V + 2 : V + P + 1);$  $E \leftarrow X(V + P + 2 : V + P + 3);$  $l \leftarrow X(V + P + 4 : 2V + P + 4);$ **retorne**  $(t, w, E, l);$ **fim**

Fonte: Próprio autor (2018).

## Pseudocódigo 4.4 – agrupa

**Entradas:** $(t, w, E, l)$  (vetores).**Saídas:** $X$  (variável completa).**Começo****defina**  $V, P$ ; (número de faixas e número de grandezas) $X(1 : V + 1) \leftarrow t$ ; $X(V + 2 : V + P + 1) \leftarrow w$ ; $X(V + P + 2 : V + P + 3) \leftarrow E$ ; $X(V + P + 4 : 2V + P + 4) \leftarrow l$ ;**retorne**  $X$ ;**fim**

Fonte: Próprio autor (2018).

Essa manipulação da solução tem como vantagem a possibilidade de referenciá-la de duas formas, de acordo com sua conveniência: para a aplicação no método de avaliação e classificação, são necessários os vetores  $t, w, E, l$  separadamente, para que possam ser empregados em suas respectivas equações. Entretanto, ao perturbar a solução por meio da adição de ruído, permutá-la ou até mesmo transferi-la como argumento de uma função, a utilização de  $X$  como um todo facilita e simplifica os procedimentos de elaboração e manutenção dos algoritmos de otimização computacional.

### 4.2.3 Avaliação da solução

Nessa dissertação, a avaliação da qualidade da solução obtida é calculada por meio da minimização da função-objetivo, que consiste na soma dos quadrados dos erros referentes às comparações entre a classificação provida pelo método e a classificação fornecida pelos especialistas. Assim, o erro é calculado pela distância numérica, inteira, entre o conceito esperado e o que foi obtido. Por exemplo, empregando critérios de engenharia de manutenção, se for esperado o conceito “C” e, por meio do emprego do método, for obtido o conceito “A”, o módulo do erro será de 9, de acordo com (4.1).

$$Err = \sum_{i=1}^{N_a} (c_{g,(i)}^e - c_{g,(i)}^c)^2 \quad (4.1)$$

sendo:

 $Err$  = valor da função objetivo, correspondente ao erro de treinamento; $N_a$  = número de amostras de óleo isolante;

$c_{g,(i)}^e$  = conceito global (variando de “A” a “E”) fornecida por uma equipe de especialistas para a  $i$ -ésima amostra de óleo (cuja obtenção será discutida na seção 4.4); e

$c_{g,(i)}^c$  = conceito global (variando de “A” a “E”) calculado pelo para a  $i$ -ésima amostra de óleo, obtido por meio do método de avaliação, detalhado no Capítulo 3.

O detalhamento do cálculo da expressão dentro do somatório é dado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Cálculo da expressão dentro do somatório para cada amostra de óleo

$(c_{g,(i)}^e - c_{g,(i)}^c)^2$	$c_{g,(i)}^c$				
	“A”	“B”	“C”	“D”	“E”
“A”	0	1	4	9	16
“B”	1	0	1	4	9
“C”	4	1	0	1	4
“D”	9	4	1	0	1
“E”	16	9	4	1	0

Fonte: Próprio autor (2018).

Observa-se que o fato de elevar a expressão ao quadrado tem como objetivo, além de trabalhar somente com erros positivos, penalizar os casos em que houver erro com distância numérica maior ou igual a dois, haja vista que erros graves são extremamente indesejados na área de engenharia de manutenção. Por outro lado, quando o método erra com distância numérica igual a um, sua função principal de nortear a equipe de especialistas não é prejudicada, pois ainda assim as indicações providas pelo método apontam na direção da tomada de decisão adequada.

Com a minimização de  $Err$  em (4.1), espera-se encontrar a solução ótima ou quase-ótima que acerte o maior número possível de casos na comparação entre o conceito calculado  $c_g^c$  e o conceito fornecido  $c_g^e$  e, quando houver erros, que estes sejam de apenas uma unidade, isto é, entre conceitos vizinhos. Assim, é garantindo que os valores de  $\mathbf{X}$  estejam em conformidade com os critérios de engenharia de manutenção que serviram como base na elaboração dos  $c_g^e$ .

Vale salientar que, para uma única iteração no ciclo da Figura 4.2, o método de avaliação deve ser executado  $N_a$  vezes, para que sejam obtidos os  $N_a$  conceitos  $c_g^c$  que serão utilizados no cálculo da função objetivo, conforme Pseudocódigo 4.5. Nele,  $\mathbf{v}_p(i)$  é o vetor que contém os valores atribuídos a todas as grandezas ( $v_1, v_2, \dots, v_p$ ) da  $i$ -ésima amostra de óleo, sendo  $q(i)$  seu respectivo parâmetro  $q$ .

## Pseudocódigo 4.5 – avaliaSolução

**Entradas:**

$X$  (parâmetros ótimos ou quase ótimos do modelo de avaliação e classificação).

**Saídas:**

$Err$  (erro calculado por meio da função objetivo).

**começo**

**defina**  $v_p, q, v_p^q, c_g^e, N_a$

$Err \leftarrow 0;$

**para**  $i = 1$  até  $N_a$  **faça**

$c_{g(i)}^c \leftarrow \text{métodoAvaliação}(v_p(i), q(i), v_p^q, X);$  (execução do método descrito no Cap.3)

$Err \leftarrow Err + (c_{g(i)}^e - c_{g(i)}^c)^2;$  (valores da Tabela 4.1)

**fim**

**retorne**  $Err;$

**fim**

Fonte: Próprio autor (2018).

#### 4.2.4 Laço de repetição

No interior do laço de repetição, a obtenção de novas soluções ocorre por meio de perturbações nas soluções anteriores. Aquelas, por sua vez, devem ser submetidas novamente às condições de contorno (Pseudocódigo 4.2) e ao procedimento de avaliação da função objetivo (Pseudocódigo 4.5). Feito isso, as melhores soluções seguem para a iteração seguinte, o que ocorre até que a condição de parada (que pode ser representada por tolerâncias na função objetivo, contagem de iterações ou até mesmo contagem de avaliações) seja satisfeita.

Vale ressaltar que a principal diferença de um algoritmo computacional para outro é justamente o modo como as perturbações ocorrem na solução inicial, representado pelo bloco “Gere nova solução” da Figura 4.2: Por exemplo, enquanto no *Hill Climbing* a perturbação se dá pela soma da solução anterior com um ruído branco, no algoritmo evolutivo ocorrem os procedimentos de permutação e mutação.

Outra diferença marcante trata-se da quantidade de soluções manipuladas a cada iteração, que pode variar de uma única solução a uma população de tamanho predefinido. Essas nuances são evidenciadas nos Pseudocódigos 4.6 a 4.9 a seguir, que incluem a inicialização e o laço de repetição dos algoritmos *Hill Climbing*, evolutivo, PSO e Simplex, respectivamente.

## Pseudocódigo 4.6 – otimizaçãoHillClimbing

**Entradas:**

$n_{max}$  (número máximo de iterações),  
 $k_{max}$  (numero máximo de iterações para avaliação pela regra do 1/5).

**Saídas:**

$X$  (parâmetros ótimos ou quase ótimos do modelo de avaliação e classificação),  
 $Err$  (erro calculado por meio da função objetivo).

**começo**

```

 $X \leftarrow$  geraSoluçãoInicial(1);
 $X \leftarrow$  condiçõesContorno( $X$ );
 $Err \leftarrow$  avaliaSolução( $X$ );
 $k \leftarrow 0$ ; (contagem de tentativas da regra do 1/5)
 $k_s \leftarrow 0$ ; (contagem de sucessos da regra do 1/5)
 $\sigma \leftarrow 0.1$ ; (desvio aplicado para gerar solução vizinha)
para  $i = 1$  até  $n_{max}$  faça
     $k \leftarrow k + 1$ ;
     $X^n \leftarrow X + \sigma \cdot G(0,1)$ ; (gera solução vizinha  $X^n$  na proximidade gaussiana  $\sigma$  de  $X$ )
     $X^n \leftarrow$  condiçõesContorno( $X^n$ );
     $Err^n \leftarrow$  avaliaSolução( $X^n$ );
    se  $Err^n < Err$  então
         $X \leftarrow X^n$ ;  $Err \leftarrow Err^n$ ;  $k_s \leftarrow k_s + 1$ ;
    fim
    se  $k = k_{max}$  então
        se  $k_s/k_{max} \geq \frac{1}{5}$  então
             $\sigma \leftarrow 2\sigma$ ;
        caso contrário
             $\sigma \leftarrow \sigma/2$ ;
        fim
     $k \leftarrow 0$ ;  $k_s \leftarrow 0$ ;
fim
fim
retorne  $X$  e  $Err$ ;
fim

```

Fonte: Próprio autor (2018).

## Pseudocódigo 4.7 – otimizaçãoEvolutivo

**Entradas:**

$n_{max}$  (número máximo de iterações),  
 $T_{pop}$  (numero de indivíduos na população);  
 $p_s$  (percentual de sobrevivência);  
 $p_m$  (probabilidade de mutação);

**Saídas:**

$X$  (parâmetros ótimos ou quase ótimos do modelo de avaliação e classificação),  
 $Err$  (erro calculado por meio da função objetivo).

**começo**

```

 $X \leftarrow$  geraSoluçãoInicial( $T_{pop}$ );
 $X \leftarrow$  condiçõesContorno( $X$ );
 $Err \leftarrow$  avaliaSolução( $X$ );
 $X \leftarrow$  crescente( $X, Err$ ); (ordena as soluções do menor ao maior erro)
 $Err \leftarrow$  crescente( $Err$ ); (ordena os erros do menor ao maior)

```

## Pseudocódigo 4.7 – otimizaçãoEvolutivo (continuação)

---

```

para  $i = 1$  até  $n_{max}$  faça
   $X \leftarrow$  sobrevivência( $X, p_s$ ); (apenas as melhores  $p_s$  soluções sobrevivem)
   $X^n \leftarrow$  permutação( $X, p_s$ ); (novas soluções são geradas por permutação)
   $X \leftarrow (X, X^n)$ ; (soluções mães e soluções filhas coexistem na mesma geração)
   $X \leftarrow$  mutação( $X, p_m$ ); (cada  $X$  tem probabilidade  $p_m$  de sofrer mutação)
   $X \leftarrow$  condiçõesContorno( $X$ );
   $Err \leftarrow$  avaliaSolução( $X$ );
   $X \leftarrow$  crescente( $X, Err$ ); (ordena as soluções do menor ao maior erro)
   $Err \leftarrow$  crescente( $Err$ ); (ordena os erros do menor ao maior)
fim
retorne  $X(1)$  e  $Err(1)$ ;
fim

```

---

Fonte: Próprio autor (2018).

## Pseudocódigo 4.8 – otimizaçãoPSO

**Entradas:**

$n_{max}$  (número máximo de iterações),  
 $T_{pop}$  (numero de indivíduos na população);  
 $v_1$  (peso de inércia);  
 $(v_2, v_3)$  (fatores de aceleração);

**Saídas:**

$X_G$  (parâmetros ótimos ou quase ótimos do modelo de avaliação e classificação),  
 $Err_G$  (erro calculado por meio da função objetivo).

**começo**

```

 $X \leftarrow$  geraSoluçãoInicial( $T_{pop}$ );
 $X \leftarrow$  condiçõesContorno( $X$ );
 $Err \leftarrow$  avaliaSolução( $X$ );
 $Err_p \leftarrow Err$ ; (menor erro da partícula)
 $X_p \leftarrow X$ ; (melhor solução da partícula)
 $(Err_G, g) \leftarrow \min(Err_p)$ ; (retorna o mínimo erro da partícula e sua posição)
 $X_G \leftarrow X(g)$ ; (melhor solução do enxame)
 $v \leftarrow 0$ ; (velocidade inicial das partículas)
para  $i = 1$  até  $n_{max}$  faça
   $v \leftarrow v_1 \cdot v + v_2 \cdot U(0,1) \cdot (X_p - X) + v_3 \cdot U(0,1) \cdot (X_G - X)$ ; (calcula velocidade)
   $X \leftarrow X + v$ ; (atualiza a solução)
   $X \leftarrow$  condiçõesContorno( $X$ );
   $Err \leftarrow$  avaliaSolução( $X$ );
  para  $j = 1$  até  $T_{pop}$  faça
    se  $Err(j) < Err_p(j)$  então (atualiza melhor erro de partícula)
       $X_p(j) \leftarrow X(j)$ ;
       $Err_p(j) \leftarrow Err(j)$ ;
    se  $Err(j) < Err_G$  então (atualiza melhor erro global)
       $X_G \leftarrow X(j)$ ;
       $Err_G \leftarrow Err(j)$ ;
  fim
fim
fim
retorne  $X_G$  e  $Err_G$ ;
fim

```

---

Fonte: Próprio autor (2018).

## Pseudocódigo 4.9 – otimização Simplex

**Entradas:**

$n_{max}$  (número máximo de iterações),  
 $(\rho, \chi, \gamma, \sigma)$  (coeficientes do método Simplex – reflexão, expansão, contração e redução)

**Saídas:**

$X$  (parâmetros ótimos ou quase ótimos do modelo de avaliação e classificação),  
 $Err$  (erro calculado por meio da função objetivo).

**começo**

$n \leftarrow 2V + P + 4$ ; (número de variáveis otimizáveis)  
 $X \leftarrow \text{geraSoluçãoInicial}(n + 1)$ ;  $X \leftarrow \text{condiçõesContorno}(X)$ ;  
 $Err \leftarrow \text{avaliaSolução}(X)$ ;  
 $X \leftarrow \text{crescente}(X, Err)$ ; (ordena as soluções do menor ao maior erro)  
 $Err \leftarrow \text{crescente}(Err)$ ; (ordena os erros do menor ao maior)

**para**  $i = 1$  **até**  $n_{max}$  **faça**

$\bar{X} \leftarrow \sum_{j=1}^n X(j)/n$ ; (cálculo do centróide)

$X_r \leftarrow \bar{X} + \rho \cdot (\bar{X} - X(n + 1))$ ; (cálculo da reflexão)

$Err_r \leftarrow \text{avaliaSolução}(X_r)$ ;

**se**  $Err_r \geq Err(1)$  **e**  $Err_r < Err(n)$  **faça**

$X(n + 1) \leftarrow X_r$ ;  $Err(n + 1) \leftarrow Err_r$ ;

**caso contrário se**  $Err_r < Err(1)$  **faça**

$X_e \leftarrow (1 + \rho \cdot \chi) \cdot \bar{X} - \rho \cdot \chi \cdot X(n + 1)$ ; (cálculo da expansão)

$Err_e \leftarrow \text{avaliaSolução}(X_e)$ ;

**se**  $Err_e < Err_r$  **faça**

$X(n + 1) \leftarrow X_e$ ;  $Err(n + 1) \leftarrow Err_e$ ;

**caso contrário**

$X(n + 1) \leftarrow X_r$ ;  $Err(n + 1) \leftarrow Err_r$ ;

**fim**

**caso contrário se**  $Err_r \geq Err(n)$  **faça**

**se**  $Err_r < Err(n + 1)$  **faça**

$X_{ce} \leftarrow (1 + \rho \cdot \gamma) \cdot \bar{X} - \rho \cdot \gamma \cdot X(n + 1)$ ; (contração externa)

$Err_{ce} \leftarrow \text{avaliaSolução}(X_{ce})$ ;

**se**  $Err_{ce} \leq Err_r$  **faça**

$X(n + 1) \leftarrow X_{ce}$ ;  $Err(n + 1) \leftarrow Err_{ce}$ ;

**caso contrário (redução)**

$X = X(1) + \sigma \cdot (X - X(1))$ ;  $Err \leftarrow \text{avaliaSolução}(X)$ ;

**fim**

**caso contrário (contração externa)**

$X_{ci} \leftarrow (1 - \gamma) \cdot \bar{X} + \gamma \cdot X(n + 1)$ ;  $Err_{ci} \leftarrow \text{avaliaSolução}(X_{ci})$ ;

**se**  $Err_{ci} \leq Err(n + 1)$  **faça**

$X(n + 1) \leftarrow X_{ci}$ ;  $Err(n + 1) \leftarrow Err_{ci}$ ;

**caso contrário (redução)**

$X = X(1) + \sigma \cdot (X - X(1))$ ;  $Err \leftarrow \text{avaliaSolução}(X)$ ;

**fim**

**fim**

**fim**

**fim**

**fim**

$X \leftarrow \text{crescente}(X, Err)$ ; (ordena as soluções do menor ao maior erro)

$Err \leftarrow \text{crescente}(Err)$ ; (ordena os erros do menor ao maior)

**fim**

**retorne**  $X(1)$  e  $Err(1)$ ;

**fim**

### 4.3 Especificações

Para fins de comparação entre os diversos algoritmos de otimização empregados, foi estabelecido que cada método seria executado 100 vezes. Desse modo, é possível realizar análises estatísticas sobre uma massa de dados significativa, por meio da comparação de valores mínimos, medianos e quartis. Outrossim, aumentando o número de execuções, maior a possibilidade de serem encontradas soluções com erro baixo, haja vista que esse fato proporcionará um mapeamento mais completo do espaço de busca da função objetivo.

Ademais, cada execução do método contará com 100.000 avaliações<sup>5</sup> da função objetivo, que é um número suficientemente grande para que os algoritmos de otimização tenham atingido resultados satisfatórios. Assim, o critério de parada é somente a contagem de avaliações: não é objetivo desse trabalho avaliar quão rápido o método encontra a solução ótima (convergência do algoritmo), mas sim qual método encontra as melhores soluções.

Para os algoritmos que necessitam de populações (evolutivo e PSO), padronizou-se a quantidade de 100 indivíduos. Esse valor, ao mesmo tempo que permite ampla variabilidade genética e exploração do espaço de busca, não compromete a quantidade de iterações do método, por ser de um valor irrisório comparado ao número total de avaliações (100.000).

A respeito dos parâmetros empregados nos algoritmos, foram considerados os valores disponíveis na literatura, que já apresentaram resultados satisfatórios para a convergência dos métodos em diversos trabalhos ([49] – [51], [55] – [63]), sendo eles:

- a) *Hill Climbing* – a solução é perturbada em até 10% ( $\sigma = 0,1$ ) para o cálculo da solução vizinha. Na regra de um quinto, o espaço de busca cai pela metade ( $\sigma/2$ ) ou dobra ( $2\sigma$ ) se a taxa de sucesso for maior ou menor que um quinto, respectivamente. Foi adotado o valor  $k_{max} = 10$  iterações para avaliação pela regra de um quinto de sucesso;
- b) Algoritmo evolutivo – foram ajustados o percentual de sobrevivência  $p_s = 50\%$  e a probabilidade de mutação  $p_m = 5\%$ . Na seleção parental – isto é, ao selecionar os indivíduos que darão origem às permutações –, foi utilizado o método de seleção proporcional por classificação. Por meio deste, indivíduos melhores apresentam mais chances de serem selecionados, sem depender, no

---

<sup>5</sup> Vale salientar a utilização do termo “avaliações” ao invés de “iterações”, uma vez que cada iteração pode contar com mais de uma avaliação da função objetivo, dependendo do algoritmo.

entanto, dos valores da função objetivo. Ademais, foram efetuadas permutações de somente um ponto, em decorrência de sua simplicidade; e mutações aleatórias, em que cada gene apresenta uma probabilidade determinada de ser alterado para um valor aleatório;

- c) PSO – foi considerado o peso de inércia constante  $v_1 = 0,5$  e os fatores de aceleração  $v_2 = v_3 = 2,0$ , seguindo recomendações da literatura ([55] – [57]);
- d) *Simplex* – os coeficientes de reflexão, expansão e contração foram escolhidos de acordo com Nelder e Mead [61], que estabelece os valores ótimos ( $\rho = 1$ ,  $\chi = 0,5$  e  $\gamma = 2$ ). Para o coeficiente de redução, tomou-se como base o valor  $\sigma = 0,5$  conforme [63].

A fim de tornar mais rápida a execução das 400 otimizações citadas nessa subseção, foi utilizado o recurso computacional de processamento paralelo em dois computadores (A e B) distintos. Assim, as tarefas são divididas entre os núcleos do processador, melhorando o desempenho de máquina e diminuindo o tempo de execução. Ao alocar dois núcleos do computador A e quatro núcleos do computador B para a realização dessa tarefa, espera-se reduzir o tempo total das otimizações em seis vezes (redução de 83% do tempo total).

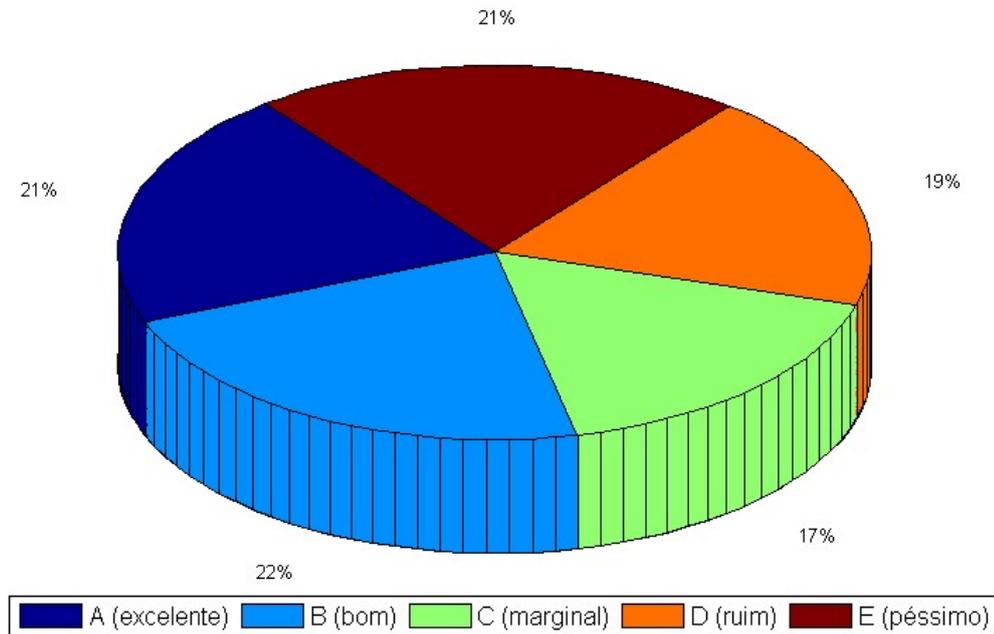
#### 4.4 Banco de dados

O desenvolvimento dessa dissertação se deu a partir dos critérios de classificação apresentados anteriormente na Tabela 3.4 e a partir de uma base de dados de ensaios físico-químicos da CELG-D (atualmente Enel Distribuição Goiás), referentes a equipamentos com potências de 1 MVA a 50 MVA, tensões nominais de 34,5 kV a 138 kV e idades de 1 a 58 anos, realizados em um período de 36 anos (de 1979 a 2015), classificados por uma equipe de especialistas, utilizando conceitos globais  $c_g^e$  que variam de “A” (excelente) a “E” (péssimo).

Primeiramente, foi selecionado um conjunto de resultados de ensaios físico-químicos para treinamento do método, realização da otimização e obtenção das variáveis, composto por 218 casos diversificados, conforme Figura 4.4.

Após a realização do treinamento, utilizou-se outro conjunto de dados para validação dos resultados, composto por 20 casos, para fins de cálculos de erros e verificação da aplicabilidade do método. O percentual de casos “A”, “B”, “C”, “D” e “E” dos conjuntos de treinamento e validação é mais bem detalhado na Tabela 4.2.

Figura 4.4 – Composição do conjunto de treinamento (218 ensaios físico-químicos)



Fonte: próprio autor (2018).

Tabela 4.2 – Composição dos conjuntos de treinamento e validação

Conceito Global ( $c_g^e$ )	Casos do Conjunto de Treinamento <sup>6</sup>		Casos do Conjunto de Validação	
	quantidade	%	Quantidade	%
“A”	45	20,6	3	15
“B”	49	22,5	6	30
“C”	37	17,0	5	25
“D”	41	18,8	4	20
“E”	46	21,1	2	10
<b>Total</b>	<b>218</b>	<b>100</b>	<b>20</b>	<b>100</b>

Fonte: próprio autor (2018).

Utilizando dois conjuntos de dados diferentes para treinamento e validação, é garantida a aplicabilidade do método na avaliação e classificação de casos futuros, isto é, que não foram submetidos ao processo de otimização. Outrossim, a utilização de conjuntos distribuídos o mais uniforme possível diminui as chances de enviesar o modelo, evitando, por exemplo, que ele se especialize nos casos “A” – *overfitting* – e erre os casos ruins. Desse modo, espera-se contribuir com uma ferramenta para auxílio no dia-a-dia das equipes de engenharia de manutenção nas tomadas de decisão referentes a transformadores de potência.

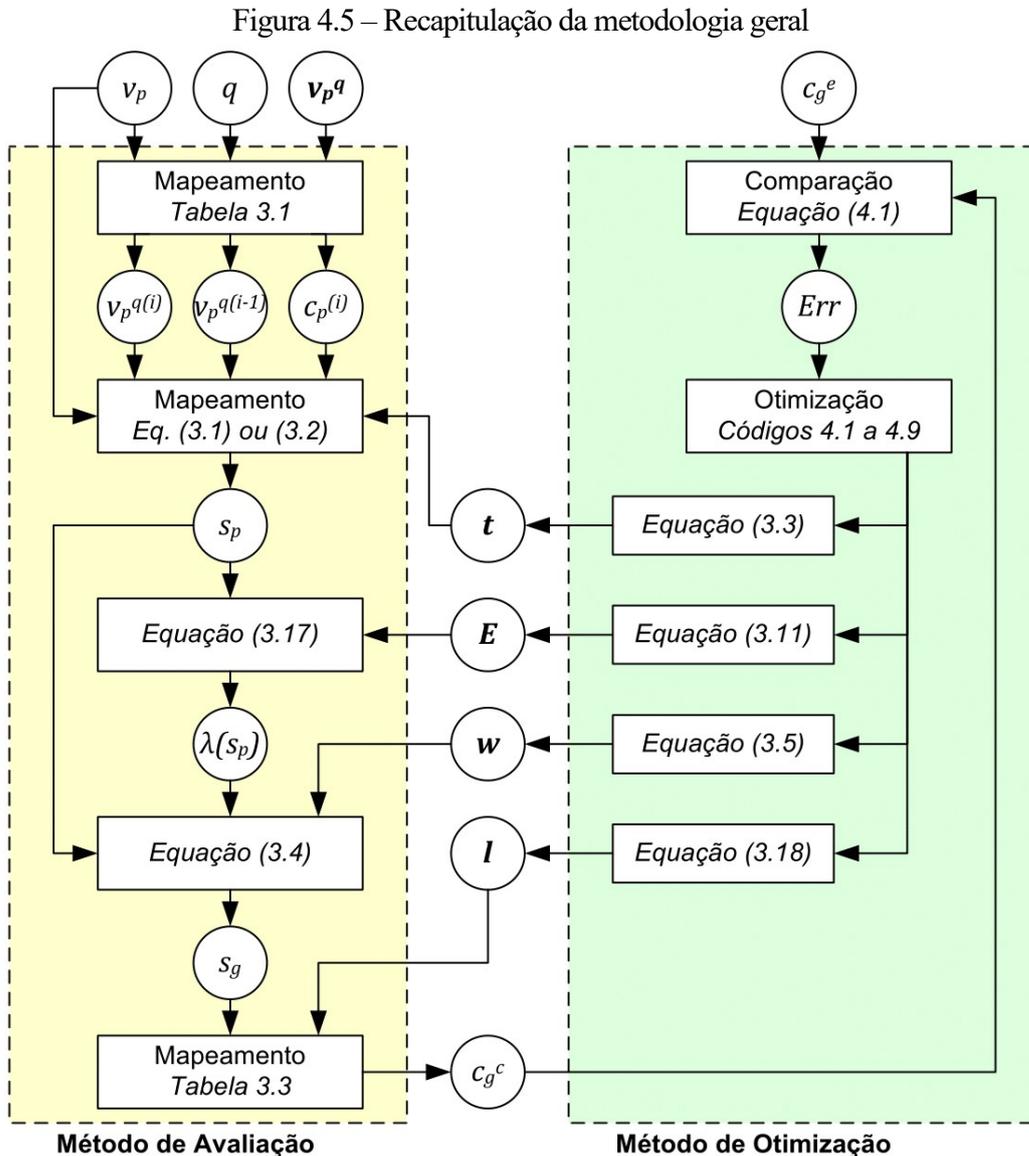
<sup>6</sup> Ao selecionar os 218 casos de treinamento do banco de dados disponível, foi tomado o cuidado de tentar equilibrar ao máximo o número de ocorrências de casos excelentes, bons, marginais, ruins e péssimos.

## 4.5 Recapitulação da Metodologia Geral

A metodologia empregada nessa dissertação de mestrado consiste de dois métodos:

- Método de avaliação e classificação (descrito no Capítulo 3), por meio do qual é calculado um conceito global; e
- Método de otimização (descrito no Capítulo 4), responsável por fornecer os valores ótimos ou quase-ótimos para as variáveis do método geral de avaliação e classificação.

Todos os elementos necessários para a concretização da metodologia geral são ilustrados resumidamente na Figura 4.5.



## 5 Resultados

Neste Capítulo, serão discutidos os resultados atingidos no desenvolvimento dessa dissertação, que consistem de:

- a) resultados do treinamento;
- b) resultados da validação; e
- c) correlação entre as grandezas físico-químicas.

### 5.1 Resultados do treinamento

Após a execução do algoritmo de otimização por 100 vezes para cada um dos quatro métodos (*Hill Climbing*, Evolutivo, PSO e Simplex) no conjunto de treinamento, foram realizadas duas avaliações estatísticas descritas a seguir, sendo elas:

- a) avaliação estatística dos erros de treinamento; e
- b) avaliação estatística dos tempos de execução dos algoritmos.

#### 5.1.1 Avaliação estatística dos erros de treinamento

Constatou-se estatisticamente que o algoritmo evolutivo apresentou os mais baixos erros de treinamento, destacando-se de forma expressiva em relação aos demais métodos. Assim, ressalta-se a capacidade deste método se adaptar muito bem a funções complexas.

Dentre os demais métodos, constatou-se que o algoritmo *Hill Climbing* apresentou valores satisfatórios, em decorrência da aplicação da regra de um quinto de sucesso. Por outro lado, os resultados obtidos por meio do PSO ilustraram que este método foi razoável e deveria ter sido aperfeiçoado por meio da introdução de extensões – por exemplo, a otimização do peso de inércia [58]. No entanto, isso elevaria o custo de processamento de máquina em relação ao esperado nesse trabalho.

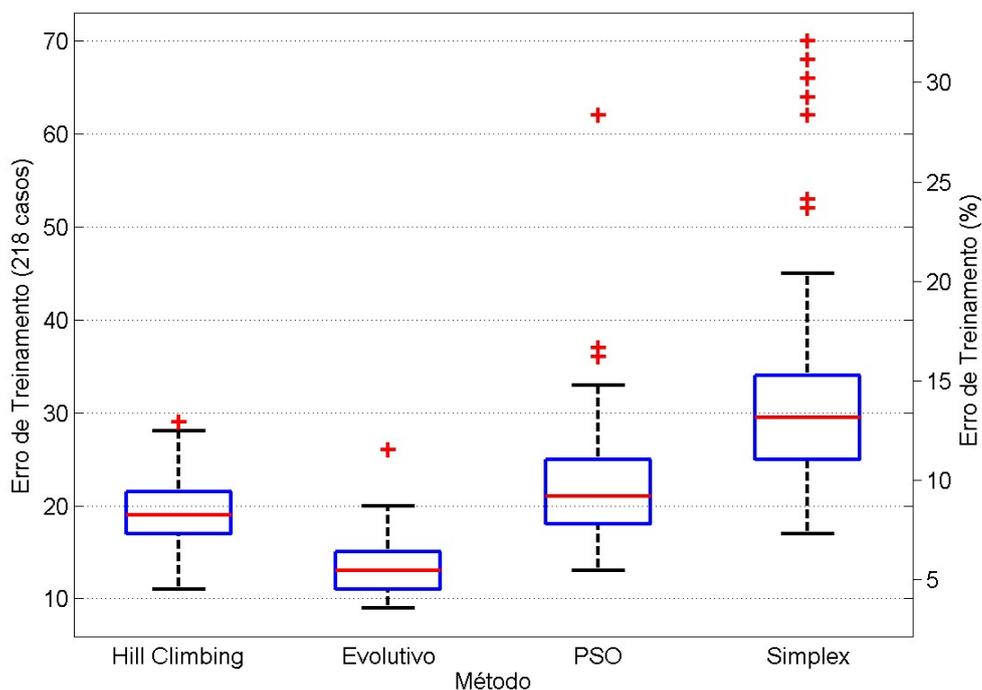
Em contrapartida, o algoritmo Simplex mostrou-se inadequado na resolução desse problema, comprovando sua ineficiência em casos que possuam mais de dez variáveis otimizáveis. Este foi o único algoritmo que se deparou com erros de distância numérica maior

ou igual a dois (quando, por exemplo, o especialista atribui conceito “B” e o método atribui conceito “D”), que são extremamente indesejados na área de engenharia de manutenção.

Na Figura 5.1 e na Tabela 5.1 são ilustrados os resultados da avaliação estatística dos erros de treinamento para fins de comparação entre os quatro algoritmos empregados na aplicação ao problema proposto. Na Figura 5.1 são apresentados dois eixos verticais, sendo o primeiro deles (à esquerda) referente à contagem absoluta de erros – calculada por meio da equação (4.1) – enquanto o eixo à direita representa uma comparação percentual ( $Err_{\%}$ ), calculada em relação ao total de 218 casos do conjunto de treinamento, conforme equação (5.1).

$$Err_{\%} = \frac{Err}{218} \quad (5.1)$$

Figura 5.1 – *Boxplot* do erro de treinamento para cada algoritmo de otimização



Fonte: Próprio autor (2018).

Tabela 5.1 – Avaliação estatística do erro de treinamento (em número absoluto de casos)

Método	Mínimo	Percentil 25%	Mediana	Percentil 75%	Máximo
<i>Hill Climbing</i>	11	17	19	21,5	29
Evolutivo	9	11	13	15	26
PSO	13	18	21	25	62
<i>Simplex</i>	17	25	29,5	34	70

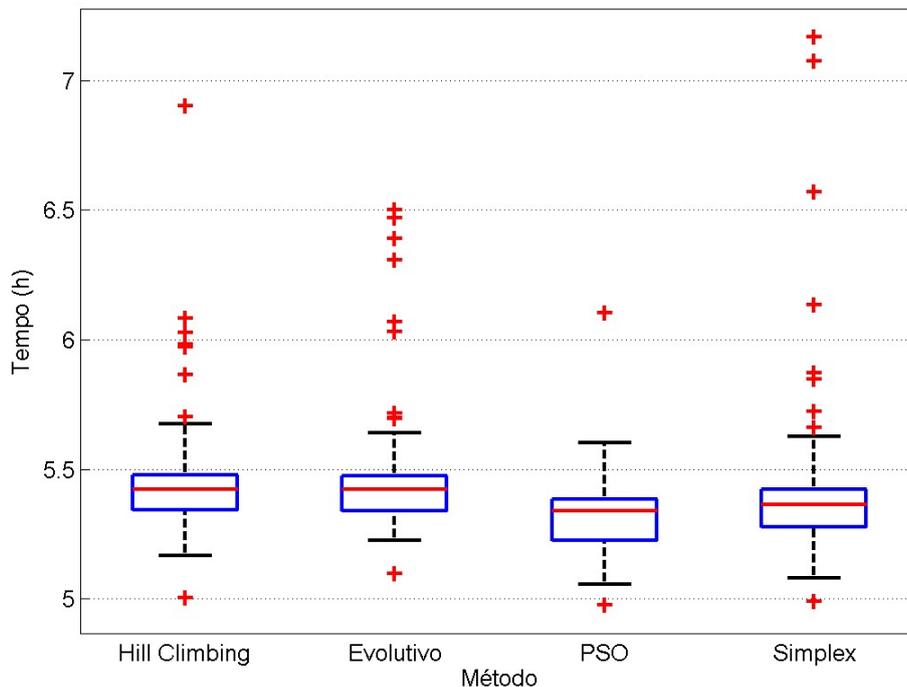
Fonte: Próprio autor (2018).

### 5.1.2 Avaliação estatística dos tempos de execução

Em decorrência da complexidade do cálculo da função objetivo – que consiste de executar o método de avaliação 218 vezes –, nota-se que todos os quatro algoritmos gastam a maior parte do tempo de processamento avaliando a solução, em detrimento do tempo gasto calculando uma nova solução a partir da anterior. Assim, é de se esperar que as diferenças em tempo de execução sejam muito pequenas.

Ao realizar testes preliminares, constatou-se que uma única avaliação da solução objetivo demanda aproximadamente 0,18 segundos. Portanto, a previsão de um algoritmo que reavalie a solução 100.000 vezes despenderia, no mínimo, cinco horas. Esta previsão foi constatada após a realização do treinamento, conforme Figura 5.2.

Figura 5.2 – *Boxplot* do tempo de execução do algoritmo para cada algoritmo de otimização



Fonte: Próprio autor (2018).

Observa-se que o algoritmo PSO apresentou, estatisticamente, tempo de execução ligeiramente menor que os demais métodos. No entanto, sua mediana é apenas 1,5% menor em relação ao algoritmo evolutivo, de modo que as diferenças de tempo (da ordem de cinco minutos) são desprezíveis no contexto dessa dissertação.

Vale ressaltar a presença de *outliers* no *boxplot* da Figura 5.3. Todavia, eles são desprezíveis, uma vez que se tratam de casos isolados (referentes a desligamentos ou sobrecarga do computador, processamento em segundo plano ou interrupção do

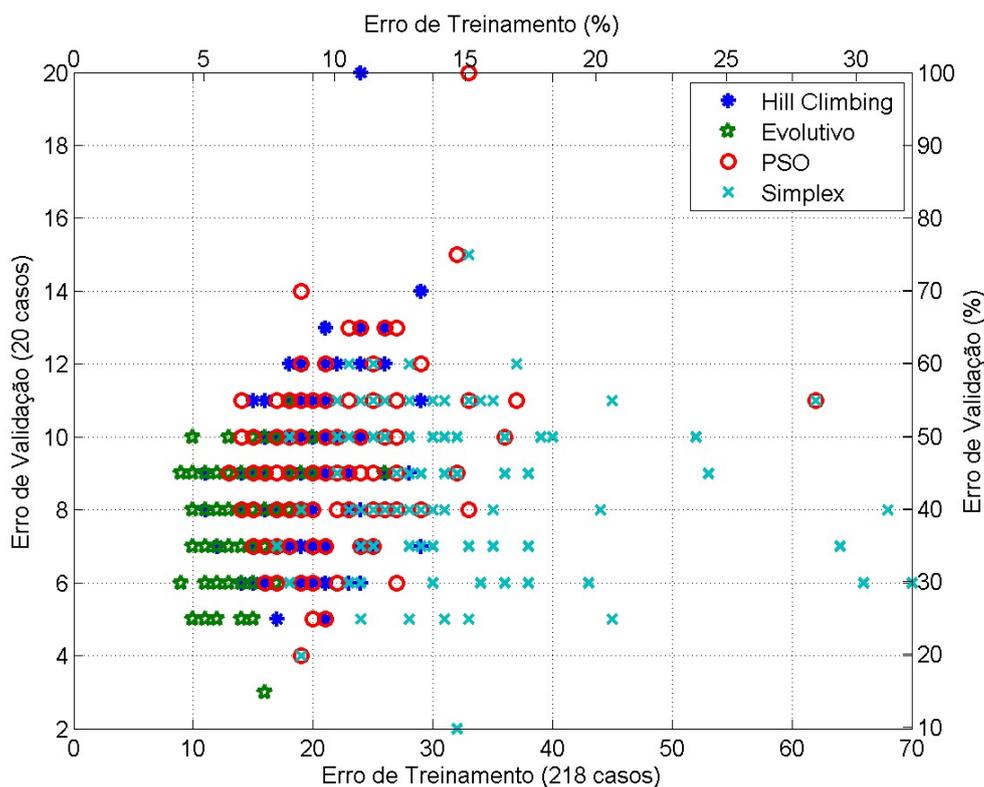
processamento), que, portanto, não apresentam qualquer relação com a comparação entre os algoritmos.

Finalmente, a utilização de processamento paralelo reduziu consideravelmente o tempo de execução total do algoritmo: ao invés de depender 90 dias com a realização sucessiva das execuções do método, foram necessários somente 17 dias para finalizar o processamento e obter todos os conjuntos de soluções, o que corresponde a uma redução significativa de 81%, cumprindo um papel fundamental na realização deste trabalho. Embora tenham sido utilizados dois computadores, não houve diferenças significativas na comparação entre os tempos de execução que justificassem tratar os resultados separadamente.

## 5.2 Resultados da validação

Para verificar se os resultados obtidos por meio do treinamento foram satisfatórios e garantir que as soluções sejam aplicáveis em casos futuros, foi realizada a validação dos resultados por meio da aplicação das soluções em um novo conjunto de 20 amostras de óleo (descrito na seção 4.4). Assim, espera-se contribuir com uma ferramenta para auxílio às equipes de engenharia de manutenção nas tomadas de decisão relativas a transformadores.

Figura 5.3 – Gráfico de dispersão do erro de validação em função do erro de treinamento

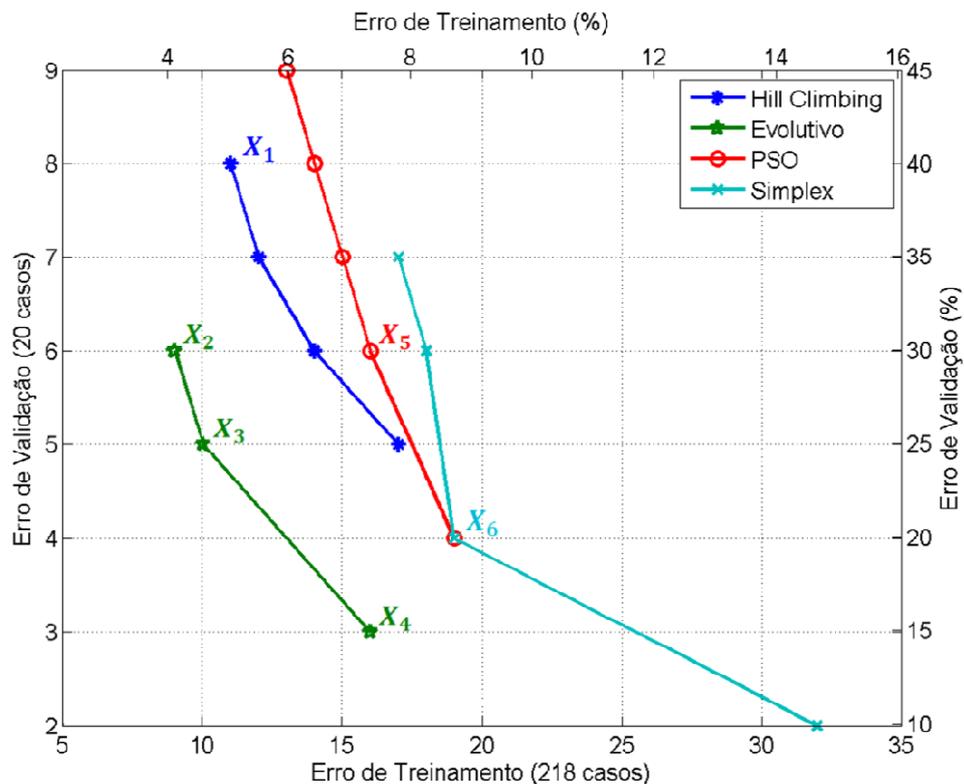


Fonte: Próprio autor (2018).

Assim sendo, na Figura 5.3 são ilustrados os resultados da validação, em que cada ponto corresponde a uma solução; sua abscissa (eixo horizontal) representa o erro de treinamento, tanto em valor absoluto (equação (4.1)) quanto em termos percentuais (equação (5.1)); e sua ordenada (eixo vertical) é o resultado do cálculo do erro de validação também em valor absoluto e percentual, de acordo com procedimento análogo ao descrito em (4.1) e (5.1).

Pela análise do gráfico da Figura 5.3, constata-se que as melhores soluções são aquelas que estão mais à esquerda e mais abaixo, apresentando, simultaneamente, erros baixos de treinamento e validação. Partindo desse pressuposto, foram elaboradas as curvas de *pareto* para os quatro algoritmos, ou seja, foram mapeadas as soluções que apresentaram melhor desempenho na avaliação dos resultados. Os resultados são ilustrados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Erro de treinamento e de validação das melhores soluções obtidas



Fonte: Próprio autor (2018).

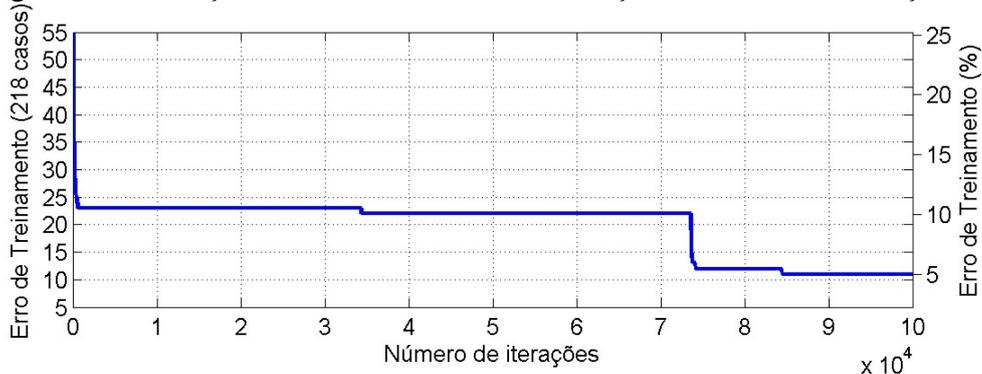
Por meio da interpretação da Figura 5.4, constata-se, novamente, que o algoritmo evolutivo superou os demais, proporcionando erros menores de treinamento e validação, sendo o mais adequado para o problema de avaliação de óleo mineral isolante.

As seis melhores soluções (dentre as 400 geradas por meio da otimização do método) foram identificadas na Figura 5.4, denominadas de  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$ . Muito embora os erros de validação sejam mais elevados que os erros de treinamento, eles atendem ao objetivo dessa dissertação, uma vez que o conjunto de ensaios utilizados nessa etapa do trabalho era

exíguo (somente 20 casos) e possivelmente enviesado, com tendência de apresentar valores de  $c_g^e$  mais rigorosos, o que representa o fator humano, de difícil reprodução a nível de *software*.

Para fins de ilustração, na Figura 5.5 é mostrado o comportamento do erro de treinamento dos métodos e do número de avaliações da função objetivo. Constatou-se que o PSO e Simplex convergiram prematuramente: o PSO localizou um ponto de mínimo  $X_5$  em 5.000 avaliações e no Simplex, a solução quase-ótima  $X_6$  (19 erros) é atingida com apenas 221 avaliações. No entanto, a cada iteração o Simplex vai reduzindo o espaço de busca, o que é fatal para uma função de  $n$  dimensões (com  $n$  elevado). Portanto, o desempenho do Simplex foi insatisfatório no contexto dessa dissertação. Casos de convergência prematura também foram identificados em soluções geradas pelo algoritmo evolutivo, conforme Figura 5.5(c).

Figura 5.5 – Evolução do erro de treinamento em função do número de avaliações



(a) solução  $X_1$  – método *Hill Climbing*, 11 erros de treinamento, 8 erros de validação

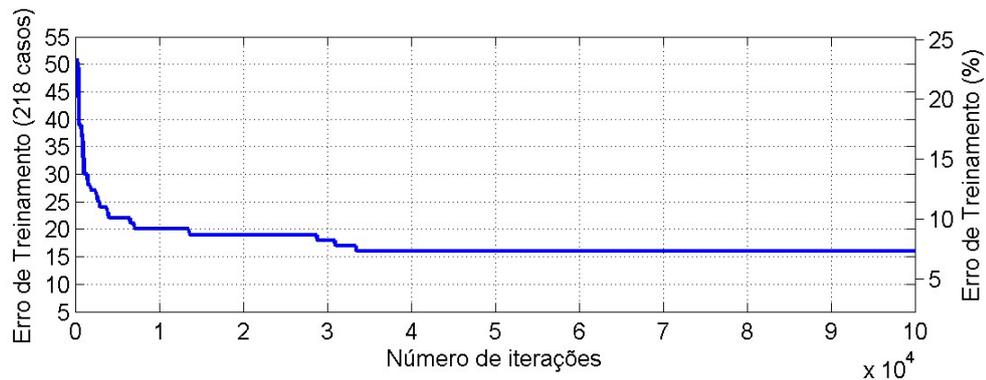


(b) solução  $X_2$  – método evolutivo, 9 erros de treinamento, 6 erros de validação

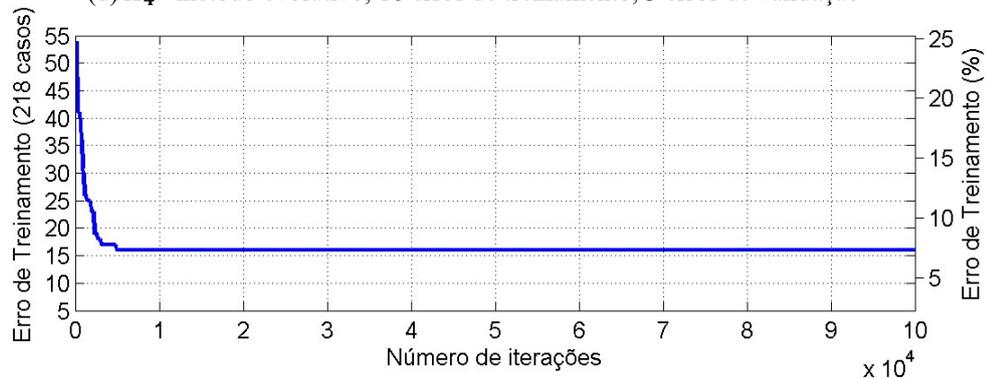


(c)  $X_3$  – método evolutivo, 10 erros de treinamento, 5 erros de validação

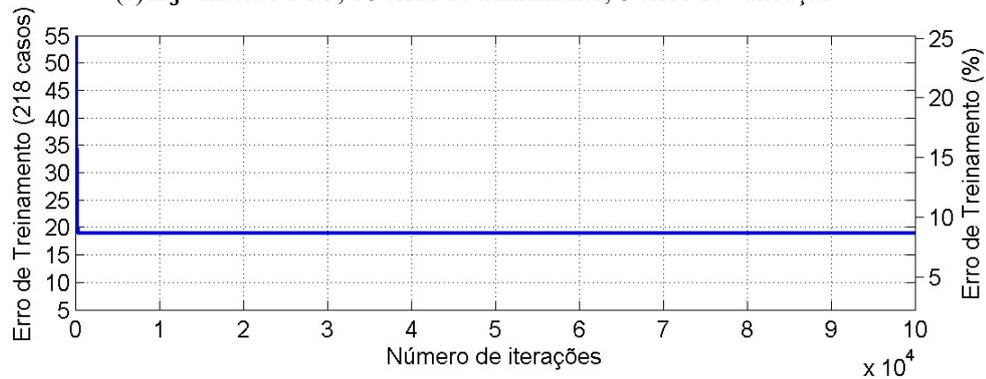
Figura 5.5 – Evolução do erro de treinamento em função do número de avaliações (continuação)



(d)  $X_4$  – método evolutivo, 16 erros de treinamento, 3 erros de validação



(e)  $X_5$  – método PSO, 16 erros de treinamento, 6 erros de validação



(f)  $X_6$  – método Simplex, 19 erros de treinamento, 4 erros de validação

Fonte: Próprio autor (2018).

Na Tabela 5.2 são enumeradas as soluções  $X_1$  a  $X_6$ , de modo que o analista possa escolher uma solução ótima dentre as seis, que seja conveniente e aplicável ao diagnóstico de óleo isolante de transformadores de potência, em conformidade com os critérios de engenharia de manutenção ilustrados no Capítulo 2 e aplicados no Capítulo 3.

A respeito da aplicação das soluções  $X_1$  a  $X_6$  nas amostras de óleo referentes ao conjunto de validação, alguns exemplos serão ilustrados no Apêndice A e, embora tenham sido observados erros de validação elevados, nota-se que os resultados apresentados proveem um forte subsídio à tomada de decisão por parte de equipes de engenharia de manutenção.

Tabela 5.2 – Composição das melhores soluções obtidas

<b>Solução X<sub>1</sub></b> <i>Hill Climbing, Err = 11, Err<sub>v</sub> = 8</i>	<b>Solução X<sub>2</sub></b> Evolutivo, Err = 9, Err <sub>v</sub> = 6	<b>Solução X<sub>3</sub></b> Evolutivo, Err = 10, Err <sub>v</sub> = 5
$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0165 \\ 0,2533 \\ 0,4496 \\ 0,7316 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,1645 \\ 0,2154 \\ 0,1129 \\ 0,2934 \\ 0,1225 \\ 0,0913 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 0,5528 \\ 0,8133 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,2242 \\ 0,4293 \\ 0,5494 \\ 0,7366 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$	$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0224 \\ 0,2759 \\ 0,4638 \\ 0,7974 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,1008 \\ 0,3466 \\ 0,1032 \\ 0,3083 \\ 0,0462 \\ 0,0949 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 0,4365 \\ 0,8573 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,2581 \\ 0,4695 \\ 0,6261 \\ 0,8009 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$	$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0694 \\ 0,3054 \\ 0,5175 \\ 0,8528 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,1941 \\ 0,2627 \\ 0,0868 \\ 0,2977 \\ 0,0691 \\ 0,0896 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 0,7275 \\ 0,9683 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,2490 \\ 0,4749 \\ 0,6339 \\ 0,8213 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$
<b>Solução X<sub>4</sub></b> Evolutivo, Err = 16, Err <sub>v</sub> = 3	<b>Solução X<sub>5</sub></b> PSO, Err = 16, Err <sub>v</sub> = 6	<b>Solução X<sub>6</sub></b> Simplex, Err = 19, Err <sub>v</sub> = 4
$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,1190 \\ 0,2858 \\ 0,6747 \\ 0,8440 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,2228 \\ 0,0987 \\ 0,0274 \\ 0,3414 \\ 0,1634 \\ 0,1463 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 0,9726 \\ 0,9685 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,2701 \\ 0,4394 \\ 0,6508 \\ 0,8263 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$	$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,1939 \\ 0,3502 \\ 0,5270 \\ 0,8557 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,2389 \\ 0,2263 \\ 0,0979 \\ 0,2690 \\ 0,0933 \\ 0,0746 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 1,0000 \\ 0,7369 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,3283 \\ 0,4804 \\ 0,6392 \\ 0,8001 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$	$t = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,0294 \\ 0,3817 \\ 0,5541 \\ 0,9429 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$ $w = \begin{bmatrix} 0,1843 \\ 0,2062 \\ 0,1201 \\ 0,2578 \\ 0,1165 \\ 0,1151 \end{bmatrix}$ $E = \begin{bmatrix} 0,5037 \\ 0,4907 \end{bmatrix}$ $l = \begin{bmatrix} 0,0000 \\ 0,2624 \\ 0,5096 \\ 0,6755 \\ 0,8661 \\ 1,0000 \end{bmatrix}$

Fonte: Próprio autor (2018).

Para ilustrar os resultados obtidos nesse trabalho, foi aplicado um algoritmo de matriz de confusão [64] – [65], que permite a visualização gráfica do desempenho do método. Nessa matriz, cada linha representa as diferentes instâncias previstas de uma classe e cada coluna representa as instâncias reais da classe. Assim, na matriz de confusão, todos os acertos estão localizados na diagonal principal, facilitando a inspeção visual dos erros, já que estes estão representados por valores fora da diagonal principal.

Aplicando a matriz de confusão nos resultados da utilização da solução  $X_3$  (algoritmo evolutivo,  $Err = 10$ ,  $Err_p = 5$ ) no conjunto de treinamento (218 ensaios), obtêm-se os resultados ilustrados na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Matriz de confusão da solução  $X_3$  aplicada no conjunto de treinamento

		Acurácia: 95,41%				
Classificação obtida ( $c_g^c$ )		Classificação objetivo ( $c_g^e$ )				
		A	B	C	D	E
A	93.3% 42	6.1% 3	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	
B	6.7% 3	89.8% 44	2.7% 1	0.0% 0	0.0% 0	
C	0.0% 0	4.1% 2	97.3% 36	2.4% 1	0.0% 0	
D	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	97.6% 40	0.0% 0	
E	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 46	

Fonte: Próprio autor (2018).

Constata-se que os valores obtidos encontram-se predominantemente na diagonal principal da matriz, corroborando com a elevada acurácia (taxa de acertos igual a 95,41%) da solução  $X_3$ . Por outro lado, todos os erros do método (casos em que  $c_g^e \neq c_g^c$ ) estão localizados a uma distância numérica unitária da diagonal principal, o que é aceitável para a aplicação desejada.

Ademais, a maioria dos erros obtidos (6 dentre os 10 totais) ocorreu no limite entre os conceitos “A” e “B”, enquanto houve somente um erro nos conceitos localizados abaixo de “C”, comprovando que o método apresenta maior precisão nos caso mais preocupantes e que demandam maior atenção das equipes de engenharia de manutenção.

### 5.3 Correlação entre as grandezas físico-químicas

Após calcular as melhores soluções obtidas por meio do procedimento de otimização computacional, constatou-se que o vetor  $\mathbf{w}$  apresenta grandes discrepâncias quando se comparam os valores de soluções distintas. Esse fato, em um primeiro momento, aparenta estranheza, haja vista que os critérios de engenharia de manutenção são muito bem estabelecidos em se tratando da importância de cada grandeza em uma avaliação global do estado do óleo do transformador. Assim sendo, essa seção tem como objetivo avaliar se há alguma relação entre as variáveis físico-químicas que justifique a ocorrência desse fenômeno.

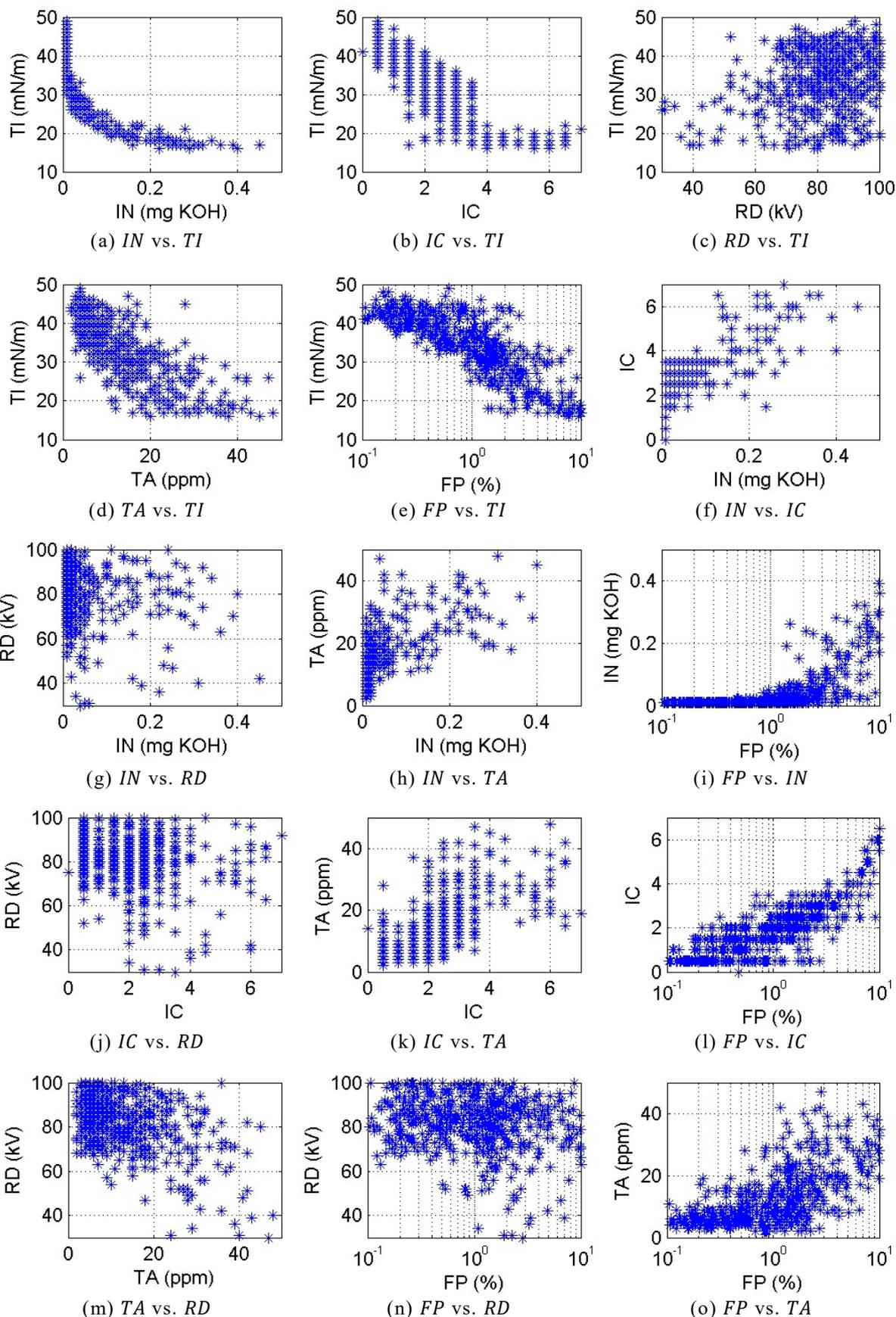
Visando a avaliar esse fenômeno, utilizou-se a base de dados de ensaios físico-químicos da empresa Enel Distribuição Goiás – referentes a equipamentos com potências de 1 MVA a 50 MVA, tensões nominais de 34,5 kV a 138 kV e idades de 1 a 58 anos, realizados em um período de 36 anos. A partir dela, foram gerados gráficos estatísticos de dispersão referentes às grandezas físico-químicas, quando avaliadas duas a duas. O resultado dessa comparação é ilustrado na Figura 5.7.

Na Figura 5.7(a), verifica-se que a tensão interfacial e o índice de neutralização apresentam elevado grau de correlação. Isso se deve ao fato de que tensões interfaciais baixas caracterizam óleos oxidados, que aceleram o processo de degradação da celulose e, por promoverem a formação de borra, reduzem a eficiência de troca de calor do equipamento. Por conseguinte, o transformador passa a operar com temperatura ligeiramente mais elevada, o que acelera ainda mais a degradação do óleo, elevando seu índice de neutralização. Isso, por consequência, reduz ainda mais sua tensão interfacial, configurando um ciclo vicioso de degradação.

Portanto, a correlação entre tensão interfacial e índice de neutralização tem uma interpretação física consistente. Entretanto, para fins de avaliação de um óleo degradado, não se pode afirmar exatamente qual é a participação quantitativa de cada grandeza nem seu impacto na atribuição do conceito do especialista  $c_g^e$ . O que se sabe é que uma combinação de uma tensão interfacial baixa com um índice de neutralização elevado resultou em um determinado conceito.

O mesmo fenômeno acontece, porém em menor escala, nos itens (b), (d), (e), (i), (l) e (o) da Figura 5.7, demonstrando, de um modo geral, que a tensão interfacial se relaciona também com outras grandezas.

Figura 5.7 – Gráfico de dispersão das grandezas físico-químicas duas a duas

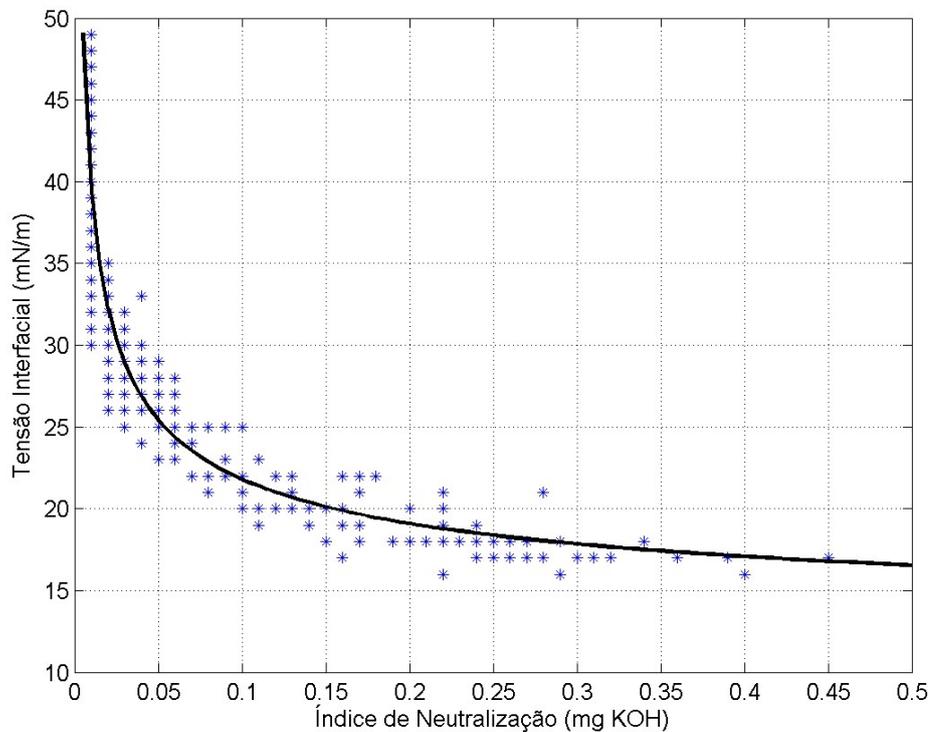


Fonte: Próprio autor (2018).

Devido à incapacidade de se mensurar exatamente qual é a importância de cada grandeza no resultado combinado da avaliação, em decorrência do elevado grau de correlação entre elas, considera-se que variações nos valores de  $w$  são toleráveis no contexto dessa dissertação.

O caso particular da dispersão da tensão interfacial em função do índice de neutralização é apresentado na Figura 5.8, acompanhado da sua respectiva curva de ajuste, indicada na equação (5.2), apresentando o coeficiente de correlação  $R^2 = 0.8444$ . Essa curva pode ser utilizada para nortear os especialistas sobre informações referentes às grandezas dos ensaios, não sendo, contudo, obrigatório que os valores satisfaçam à condição (5.2).

Figura 5.8 – Correlação entre a tensão interfacial e o índice de neutralização



Fonte: Próprio autor (2018).

$$TI(IN) = 3,974 \cdot IN^{-0,4257} + 11,21 \quad (5.2)$$

## 6 Conclusões

Conclui-se que essa dissertação atingiu com êxito os objetivos de comparar o desempenho de métodos de otimização em um problema específico de avaliação de óleo mineral isolante por meio de ensaios físico-químicos; e obter uma solução ótima, aplicável ao diagnóstico de óleo isolante de transformadores de potência, em conformidade com critérios de Engenharia de Manutenção, auxiliando na tomada de decisões e na elaboração de diagnósticos rápidos e eficientes.

Foram realizadas avaliações estatísticas dos erros de treinamento e erros de validação obtidos por meio dos métodos de otimização *Hill Climbing*, Evolutivo, PSO e Simplex, visando a verificar qual deles apresenta melhores resultados diante de um problema de aplicação na área de engenharia de manutenção. Dentre os quatro métodos utilizados, o algoritmo evolutivo apresentou os menores erros tanto no conjunto de treinamento quanto de validação, comprovando sua facilidade de adaptação a problemas representados por funções não diferenciáveis, não-lineares, e descontínuas, ainda que o espaço de busca seja amplo ( $n$ -dimensional).

Vale ressaltar que foram enumeradas seis dentre as quatrocentas soluções obtidas por meio de otimização, de modo que o analista possa escolher, de acordo com a sua conveniência, uma solução ótima dentre elas e aplicá-la ao diagnóstico de óleo isolante de transformadores de potência, em conformidade com os critérios de engenharia de manutenção ilustrados no Capítulo 2 e aplicados no Capítulo 3.

Adicionalmente, comprovou-se a existência de uma forte correlação entre as grandezas físico-químicas, o que justifica as diferenças observadas entre as soluções, em se tratando dos pesos atribuídos às grandezas.

Outrossim, o método SDPN mostrou-se poderoso na aplicação proposta, uma vez que os erros apresentados foram de apenas um degrau em relação ao valor esperado. Como vantagem em relação a outros métodos de inteligência artificial, a SDPN possibilita a classificação dos transformadores em ordem crescente ou decrescente de notas individuais e finais, permitindo diferenciar rigorosamente equipamentos que apresentem o mesmo conceito final. Deste modo, a classificação por nota provê um ordenamento de prioridades de

manutenção e intervenção em um determinado conjunto de equipamentos, com ações recomendadas para nortear a tomada de decisão da equipe de engenheiros responsável.

Como contribuição dessa dissertação de mestrado, apresentou-se um aprimoramento da Soma Duplamente Ponderada e Normalizada (SDPN) para obtenção de notas e conceitos, possibilitando a avaliação e a classificação de equipamentos. Este aprimoramento deu-se por meio da normalização dos parâmetros da equação exponencial, reduzido em uma variável, o que possibilitou resultados mais assertivos e generalizado, permitindo sua aplicabilidade em diferentes situações. Os resultados desse aprimoramento são evidenciados no Apêndice A, no qual as soluções obtidas por meio de otimização foram aplicadas em casos reais de ensaios físico-químicos, apresentando avaliações satisfatórias e coerentes com as amostras de óleo analisadas.

Quando aplicado a transformadores de potência [25] – [31], especificamente aos resultados provenientes de ensaios físico-químicos realizados em amostras de óleo retiradas destes equipamentos, o método ofereceu uma avaliação global do estado de conservação do isolamento líquido do transformador, indicando a necessidade de possíveis intervenções preventivas. Consequentemente, assim que os resultados dessa dissertação forem implementados, espera-se contribuir como uma ferramenta de apoio a equipes especialistas em engenharia de manutenção na tomada de decisões, reduzindo o número de interrupções não programadas e conferindo maior confiabilidade ao sistema elétrico de potência.

## Referências

- [1] MOURA, N.K; RIBEIRO, C.J; MARQUES, A.P; AZEVEDO, C.H.B. Transformadores de Potência: Detecção de Descargas Parciais. In: **Congresso de Iniciação Científica do Inatel – INCITEL 2013**. Santa Rita do Sapucaí, MG, maio 2013.
- [2] DUVAL, M. e LAMARRE, L. The Duval Pentagon – a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 30, n. 6, p. 9-12, dez. 2014.
- [3] SINGH, S. e BANDYOPADHYAY, M. N. Dissolved gas analysis technique for incipient fault diagnosis in power transformers: A bibliographic survey. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 26, n. 6, p. 41-46, dez. 2010.
- [4] CHEN, L.J. et al. Study of Partial Discharge Measurement in Power Equipment Using Acoustic Technique and Wavelet Transform. In: **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1575-1580, jul. 2007.
- [5] HOOSHMAND, R. A. et al. Adaptive neuro-fuzzy inference system approach for simultaneous diagnosis of the type and location of faults in power transformers. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 28, n. 5, p. 32-42, out. 2012.
- [6] LI, J. et al. Optimal dissolved gas ratios selected by genetic algorithm for power transformer fault diagnosis based on support vector machine. In: **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 2, p. 1198-1206, abr. 2016.
- [7] CONTIN, A. Diagnostics of insulation systems by means of partial discharges. In: Diagnostics for electrical machines, power electronics and drives (SDEMPED), **2015 IEEE 10th International Symposium**. Guarda, p. 191-197, 2015.
- [8] ABU-ELANIEN, A. E. B. et al. Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic. In: **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 4, p. 2029-2036, out. 2012.
- [9] ASHKEZARI, A. D. et al. Application of fuzzy support vector machine for determining the health index of the insulation system of in-service power transformers. In: **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 20, n. 3, p. 965-973, jun. 2013.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5356-1**. Transformadores de Potência. Parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro, 2010.
- [11] AMERICAN NATIONAL STANDARD – ANSI. **Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems**. Portage, 2011.

- [12] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **C57.125-1991**: IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors. New York, 1991.
- [13] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **C57.152-2013**: IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors. New York, 2013.
- [14] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **IEC 60599**: Mineral Oil-Impregnated Electrical Equipment in Service-Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases. Geneva, Switzerland, 2015.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10576:2017**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos – Diretrizes para supervisão e manutenção. Rio de Janeiro, 2017.
- [16] CELG-D. **NTC-36**. Transformador de Potência: Especificação. Revisão 7. Goiânia, out. 2016.
- [17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **IEC 60422**: Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance. Geneva, 2013.
- [18] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **C57.106-2015**: IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. New York, 2015.
- [19] LI, Y., et al. Aging Assessment of Power Transformer Using Multi-parameters. In: **International Journal on Electrical Engineering and Informatics**, v. 5, n. 1. mar. 2013.
- [20] JAHROMI, A. et al. An approach to power transformer asset management using health index. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 25, n. 2, p. 20-34, mar. 2009
- [21] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR – BUREAU OF RECLAMATION. **Facilities Instructions, Standards and Techniques (FIST) Manuals**. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, v. 3-31, 2000. Disponível em: <[www.usbr.gov](http://www.usbr.gov)>. Acessado em 19 nov. 2015.
- [22] PAUL, G. **Electric Power Equipment Maintenance & Testing**. New York: Mark Dekker, Inc.1998.
- [23] GRAY, I. A. R. **Transformer Chemistry Services**. A Guide to Transformer Oil Analysis. Disponível em: <[http://www.satcs.co.za/Transformer\\_Oil\\_Analysis.pdf](http://www.satcs.co.za/Transformer_Oil_Analysis.pdf)>. Acessado em 19 nov. 2015.
- [24] DONGALE, P. J. **Equipment Condition Assessment and its Importance in Estimation and Prediction of Power System Reliability**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação. Wichita State University, 2008.

- [25] MARQUES, A.P.; MOURA, N.K; DIAS, Y.A; RIBEIRO, C.J.R; ROCHA, A.S; BRITO, L.C; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L. Method for the Evaluation and Classification of Power Transformer Insulating Oil based on Physicochemical Analyses. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**. v. 33, n. 1, p. 40-50, 2017.
- [26] MARQUES, A.P; MOURA, N.K; RIBEIRO, C.J.; DIAS, Y.A; RODRIGUES, A; ROCHA, A.S; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L; SOUSA, F. DE C; BRITO, L.C. Insulation Resistance of Power Transformers – Method for Optimized Analysis. In: **19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids – ICDL**. Manchester, United Kingdom, jun. 2017.
- [27] MARQUES, A.P; DIAS, Y.A; MOURA,N.K; RIBEIRO, C.J.R; ROCHA, A.S; BRITO, L.C; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L. Método para Análise Otimizada de Ensaio Elétrico de Fator de Potência do Isolamento. In: **Revista IEEE América Latina**. v. 16, n. 3, p. 823-828.
- [28] MARQUES, A.P; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L; MACHADO, S.G; RIBEIRO, C.J; MOURA, N.K; DIAS, Y.A; BRITO, L.C. Metodologia para Reenergização de Transformadores de Potência após Interrupções não Programadas no Sistema Elétrico. In: **XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTE**. Curitiba, p. 1-9. out. 2017.
- [29] MOURA, N. K. **Uma metodologia geral para avaliação e classificação de transformadores de potência imersos em óleo isolante**. Relatório interno. Goiânia, 2018.
- [30] MARQUES, A.P. **Diagnóstico otimizado de transformadores de potência mediante a integração de técnicas preditivas**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e da Computação. Goiânia – GO: UFG, 2018.
- [31] MOURA, N. K. **Transformadores de Potência: Aplicação de um Método para Análise Otimizada dos Ensaio Elétrico de Resistência de Isolamento**. Monografia de Engenharia Elétrica. Goiânia – GO: UFG, 2016.
- [32] MARQUES, A.P; MOURA, N. K; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L; BRITO, L. C; GUIMARÃES, I. L. B; SILVA, T. H. V; RIBEIRO, C.J. Estudos sobre Transformadores de Potência: Parte I. In: **12º CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão**. Goiânia, p. 1-5, 2015.
- [33] MARQUES, A.P; RIBEIRO, C.J; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L; SOUSA, F.R.C; MOURA, N.K; ROCHA, A.S; BRITO, L.C. Metrics for partial discharge detection by the acoustic emission technique to support decision-making. In: **2016 IEEE Electrical Insulation Conference**. Montreal, Canada, jun. 2016.
- [34] BRITO, L.C; MARQUES, A.P; RIBEIRO, C.J; ROCHA, A.S; DIAS, Y.A; MOURA, N.K; PALHARES, P.H.S; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L. Abordagem Combinada dos Guias IEEE e IEC para Interpretação de Análises de Gases Dissolvidos em Óleo Mineral Isolante. In: **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2016**. Natal – RN, p. 1-6, maio, 2016.

- [35] BRITO, L.C; MARQUES, A.P; RIBEIRO, C.J; AZEVEDO, C.H.B; SANTOS, J.A.L; MOURA, N.K; DIAS, Y.A; ROCHA, A.S. Expert system with optimized diagnosis of power transformers. In: **WCSEIT2017 – IV Congresso Mundial em Engenharia de Sistemas e Tecnologia de Informação**. Guimarães, Portugal, 2017.
- [36] FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília, 2013.
- [37] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003.
- [38] MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.
- [39] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, jan. 2018.
- [40] KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.
- [41] MARQUES, A.P et al. Técnicas Preditivas de Manutenção em Transformadores de Potência: Um estudo de caso. In: **WCSEIT'2013 - World Congress on Systems Engineering and Information Technology**. Porto, Portugal, 2013.
- [42] BARBOSA, F.R. et al. Application of an artificial neural network in the use of physicochemical properties as a low cost proxy of power transformers DGA data. In: **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. v. 19, n. 1, p. 239-246, fev, 2012.
- [43] MOULAI, H. et al. Physico-chemical properties of power transformer oil mixtures. In: **Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference**. Valletta, p. 1105-1110, 2010.
- [44] BECHARA, R. **Análise de Falhas de Transformadores de Potência**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. São Paulo-SP: USP, 2010.
- [45] BARBOSA, S. R. **Estudo dos efeitos da sobretensão em transformadores de potência aliada a carregamentos acima da potência nominal**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte – MG: UFMG, 2005.
- [46] RUSSELL, S. e NORVIG, P. **Artificial intelligence**. A modern approach. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2003.
- [47] LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma Importante Ferramenta da Inteligência Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- [48] RECHENBERG, I. **Evolutions strategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution**. Frommann-Holzboog. Verlag, 1973.

- [49] JONES, G. **Genetic and Evolutionary Algorithms**. In: Encyclopedia of Computational Chemistry, 1990.
- [50] WONG, K.C. **Evolutionary Algorithms: Concepts, Designs, and Applications in Bioinformatics**. In: Nature-Inspired Computing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. Hershey, Pennsylvania, 2015.
- [51] CARR, J. **An Introduction to Genetic Algorithms**. Notas de aula. Walla Walla – Washington: Whitman College, p. 1-40, maio 2014.
- [52] DARWIN, C. **A Origem das Espécies**. 1. ed. São Paulo: Martin Claret, 2014.
- [53] KINNEAR, K.E. A perspective on the Work in this Book. In: K. E. Kinnear, **Advances in Genetic Programming**, Cambridge: MIT Press, p. 3-17, 1994.
- [54] KENNEDY, J. e EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95 – **International Conference on Neural Networks**, v. 4, p. 1942–1948, 1995.
- [55] BAI, Q. Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithm. In: **Computer and Information Science**. Toronto, v. 3, n. 1, 2010.
- [56] SILVA, A. F. Algoritmo de Otimização com Enxame de Partículas auxiliado por Metamodelos. In: **XI Simpósio de Mecânica Computacional, II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional**, SIMMEC/EMMCOMP 2014. Juiz de Fora, 2014.
- [57] ALAM, M. N. **Particle Swarm Optimization: Algorithm and its Codes in MATLAB**. Research Gate, 2016.
- [58] PRIETO, L. P. V. **Uma Eficiente Metodologia para Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica usando Otimização por Enxame de Partículas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Santo André – SP: Universidade Federal do ABC, 2015.
- [59] MARTINS, J. R. R. A. **A Short Course on Multidisciplinary Design Optimization**. Chapter 6: Gradient-Free Optimization. University of Michigan. Michigan, 2012.
- [60] MATHEWS, J. H. e FINK, K. D. **Numerical Methods using Matlab**. 4. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall Inc. 2004.
- [61] NELDER, J. A. e MEAD, R. **A simplex method for function minimization**. Comput. J. 7, p. 308–313, 1965.
- [62] GAO, F. e HAN, L. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. In: **Computational Optimization and Applications**, 2012, v. 51, n. 1, p. 259–277. Springer. 2010.
- [63] GONÇALVES, A. M. S. **O problema de Min-Max-Min com restrições pelo Método de Nelder-Mead**. Tese de Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação. Rio de Janeiro – RJ: UFRJ, 2013.

- [64] KOHAVI, R; PROVOST, F. Glossary of terms. **Machine Learning**, v. 30, n. 2-3, p. 271-274, 1998.
- [65] STEHMAN, S. V. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. **Remote Sensing of Environment**, v. 62 n. 1, p. 77–89, 1997.

## APÊNDICE A – Estudos de caso

Nesse apêndice são ilustrados alguns estudos de caso, referentes à aplicação das soluções obtidas por meio da otimização computacional em dados reais referentes a amostras de óleo isolante de transformadores de potência.

### A.1 Caso 1: Solução $X_1$ aplicada ao TR-1

No caso do transformador TR-1 (34,5 kV), foi realizado um conjunto de ensaios físico-químicos no dia 22/05/2015, apresentando os valores ilustrados na Tabela A.1. Com a aplicação da solução  $X_1$  (*Hill Climbing*, 11-8), foram obtidas notas ( $s_p$ ) e conceitos individuais ( $c_p$ ) e os pesos  $\lambda(s_p)$ , que embasaram o cálculo da nota ( $s_g$ ) e do conceito ( $c_g$ ) globais. Note que o óleo encontra-se em bom estado (conceito “B”), mesmo apresentando fator de potência um pouco acima dos limites estabelecidos (conceito “C”).

Tabela A.1 – Solução  $X_1$  aplicada ao TR-1

Grandeza	Leitura	$s_p$	$\lambda(s_p)$	$c_p$
TI (mN/m)	28	0,4713	2,0973	B
IN (mg KOH)	0,04	0,6913	1,4141	B
IC	2	0,5436	1,8172	B
RD (kV)	80	0,7853	1,2420	A
TA (ppm)	19	0,6188	1,5879	B
FP (%)	1,65	0,3646	2,6525	C
<b>Nota global (<math>s_g</math>)</b>		<b>0,5915</b>	<b>Conceito global (<math>c_g</math>)</b>	<b>B</b>

Fonte: Próprio autor (2018).

### A.2 Caso 2: Solução $X_3$ aplicada ao TR-2

No caso do transformador TR-2 (69 kV), foi realizado um conjunto de ensaios físico-químicos no dia 13/08/2014, apresentando os valores ilustrados na Tabela A.2. Com a aplicação da solução  $X_3$  (*Evolutivo*, 10-5), foram obtidas notas ( $s_p$ ) e conceitos individuais

( $c_p$ ) e os pesos  $\lambda(s_p)$ , que embasaram o cálculo da nota ( $s_g$ ) e do conceito ( $c_g$ ) globais. Nesse caso, a baixa rigidez dielétrica (“D”) foi o fator decisivo para que a amostra de óleo recebesse o conceito ruim (também “D”).

Tabela A.2 – Solução  $X_3$  aplicada ao TR-2

Grandeza	Leitura	$s_p$	$\lambda(s_p)$	$c_p$
<i>TI</i> (mN/m)	28	0,5433	1,8245	B
<i>IN</i> (mg KOH)	0,05	0,7570	1,2649	B
<i>IC</i>	2,5	0,5175	1,9289	B
<i>RD</i> (kV)	47	0,2346	4,1168	D
<i>TA</i> (ppm)	18	0,5846	1,6776	B
<i>FP</i> (%)	2,339	0,3282	3,1177	C
<b>Nota global (<math>s_g</math>)</b>		<b>0,3950</b>	<b>Conceito global (<math>c_g</math>)</b>	<b>D</b>

Fonte: Próprio autor (2018).

### A.3 Caso 3: Solução $X_5$ aplicada ao TR-3

No caso do transformador TR-3 (138 kV), foi realizado um conjunto de ensaios físico-químicos no dia 28/04/2015, apresentando os valores ilustrados na Tabela A.3. Com a aplicação da solução  $X_5$  (PSO, 16-6), foram obtidas notas ( $s_p$ ) e conceitos individuais ( $c_p$ ) e os pesos  $\lambda(s_p)$ , que embasaram o cálculo da nota ( $s_g$ ) e do conceito ( $c_g$ ) globais. Esta amostra de óleo é excelente (“A”), apresentando valores satisfatórios em todas as grandezas.

Tabela A.3 – Solução  $X_5$  aplicada ao TR-3

Grandeza	Leitura	$s_p$	$\lambda(s_p)$	$c_p$
<i>TI</i> (mN/m)	42	0.8846	12.382	A
<i>IN</i> (mg KOH)	0,01	10.000	10.000	A
<i>IC</i>	1,5	0.7462	16.544	B
<i>RD</i> (kV)	78	0.7023	18.258	B
<i>TA</i> (ppm)	3	0.9134	11.709	A
<i>FP</i> (%)	0,398	0.8097	14.422	B
<b>Nota global (<math>s_g</math>)</b>		<b>0,8194</b>	<b>Conceito global (<math>c_g</math>)</b>	<b>A</b>

Fonte: Próprio autor (2018).