MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação Programa de Pós-Graduação em engenharia Elétrica e de Computação

Felipe Resende de Carvalho Sousa

# Uma Contribuição Computacional para a Análise da Migração de Umidade em Sistemas Isolantes Papel-Óleo de Transformadores de Potência

Goiânia 2016

# Uma Contribuição Computacional para a Análise da Migração de Umidade em Sistemas Isolantes Papel-Óleo de Transformadores de Potência

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

**Área de concentração:** Engenharia Elétrica **Orientador:** Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito

Goiânia, 2016





#### TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) 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), 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: [X] Dissertação [] Tese

| 2. Ident                                      | ificaç  | ção da   | a Tese         | ou Di               | sse            | rtação                 |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
|---|---|----------|----------------|---------------------|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|----------------------|---------------|-------------|
| Autor (a                                      | Autor (a): Felipe Resende de Carvalho Sousa   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| E-mail:                                       | f   | felipe.e | engele         | t@gma               | il.co          | m                      |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Seu e-m                                       | nail p  | ode se   | er dispo       | onibiliza           | ado            | na pági                | na?               | [X]Sin               | n            |                 | []              | Não          | )                    |               |             |
| Vínculo                                       | empr  | egatíc   | io do a        | autor               |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Agência                                       | de fo   | omente   | o:             |                     |                |                        | <i></i>           | <i></i>              |              |                 |                 |              | Sigla:               |               |             |
| País:   | Bras  | sil      |                |                     |                | UF:                    | GO                | CNP                  | I:           |                 |                 |              |                      |               |             |
| Título:                                       | Uı  | ma Con   | tribuiç        | ão Comp<br>Isolante | outac<br>es Pa | cional par<br>pel-Óleo | ra a Aı<br>de Tra | nalise da<br>ansform | a Mi<br>ado  | graçã<br>res de | o de L<br>Potêr | Jmid<br>1cia | lade em S            | Sisten        | las         |
|   |   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Palavras                                      | s-cha   | ve:      | manu<br>genéti | tenção,<br>ca, sist | mé<br>ema      | todo da<br>a isolani   | s dife<br>te, tra | renças<br>ansforr    | s fin<br>mad | itas,<br>lores  | óleo,<br>de p   | , pa<br>otêi | pel, pro<br>ncia, un | gran<br>nidao | nação<br>le |
| Título er                                     | Título em outra língua: A Computational Contribution to the analisys of Moisture Mi-<br>gration inside Paper-Oil Insulating Systems inside Power<br>Transformers        |          |                |                     |                | re Mi-<br>Power        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
|   |   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Palavras<br>gua:                              | Palavras-chave em outra lín-<br>gua: finite difference method, genetic programming, insula-<br>ting systems, maintenance, moisture, oil, paper, po-<br>wer transformers |          |                |                     |                |                        | nsula-<br>r, po-  |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| I   |   |          | ~              | -                   |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Area de                                       | conc  | entrag   | ao:            | Engen               | nar            | la Eletri              | ca                | 16                   |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Data de                                       | Data deresa: (dd/mm/aaaa) 10/06/2016  |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Oriontac                                      | Programa de Pos-Graduação:  |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| E-mail:                                       | E-mail:   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| Co-orier                                      |   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| (a):*   | lauo  |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| E-mail:                                       |   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |
| *Necessita do CPE quando não constar no SisPG |   |          |                |                     |                |                        |                   |                      |              |                 |                 |              |                      |               |             |

### 3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM

da com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup> Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do (a) autor (a)

Data: 24/06/2016

<sup>&</sup>lt;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.

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





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO



### FOLHA DE APROVAÇÃO

### "Uma Contribuição Computacional para a Análise da Migração de Umidade em Sistemas Isolantes Papel-Óleo de Transformadores de Potência"

### **FELIPE RESENDE DE CARVALHO SOUSA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos senhores:

| - besonde de Culatit                             |
|--|
| Leonardo da Cunha Brite Orientador (EMC/UFG)     |
| Hitten.  |
| Carlos Alberto Tenório de Carvalho Júnior - UFRO |
| Ribeiro  |
| Cacilda de Jesus Ribeiro - EMC/UFG               |

Goiânia, 10 de junho de 2016

Av.Universitária, nº 1488, Qd.86, Bl.A – 3º piso – 74605-010 - Setor Leste Universitário -Goiânia – Goiás Fones: (62) 3209 6293 – (62) 3209-6079 Telefax: (62) 3209-6292 Home Page:www.mestrado.emc.ufg.br

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e minha namorada Mariana, pelo apoio, amor incondicional e paciência, para que pudesse conquistar essa realização profissional.

A inteligência é o que você usa quando não sabe o que fazer

Jean Piaget

### Agradecimentos

A Deus, por propiciar a dádiva da vida e da inteligência, sem as quais a humanidade não teria chegado ao estágio atual.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás – UFG, pela oportunidade oferecida para a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito, pela orientação, amizade, apoio, pelas enormes contribuições na área de computação e por mostrar novas formas de se encarar problemas tradicionais.

Ao Eng.º Me. André Pereira Marques, gerente do Departamento de Engenharia e Controle da Manutenção da CELG Distribuição S.A., e gestor do projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de uma Metodologia Otimizada e de um Sistema Inteligente de Diagnóstico e de Planejamento para a área de Engenharia de Manutenção em Transformadores de Potência", meus agradecimentos pelo enorme auxílio no entendimento dos fenômenos de engenharia.

À Prof.<sup>a</sup> Dr..<sup>a</sup> Cacilda de Jesus Ribeiro, coordenadora do projeto de P&D supracitado, no qual esse trabalho foi inserido, meus agradecimentos pelo incentivo e apoio na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Tenório de Carvalho Júnior, pelas sugestões e contribuições fornecidas para a melhoria deste trabalho.

À CELG Distribuição S.A., pela infraestrutura fornecida para a coleta de dados desta pesquisa, sem a qual inviabilizaria este trabalho.

Ao Departamento de Manutenção da Alta Tensão, representado pelos Eng.º José Augusto Lopes dos Santos, Eng.º Me. Sérgio Gomes Machado, e Eng.º Me. Cláudio Henrique Bezerra Azevedo, por mostrar as alegrias e desafios no exercício da profissão de Engenheiro Eletricista.

À equipe do Laboratório de Materiais Isolantes, em especial ao Químico Marcos Reginaldo Blanco, por me clarificar conceitos de química, ciência base desta pesquisa.

Aos colegas celgueanos, em especial aos guerreiros da área de manutenção, responsáveis por manter o funcionamento do sistema elétrico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro

A todos que de alguma forma contribuíram para a confecção deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

### Resumo

A predição dos níveis de umidade no interior de transformadores de potência se mostra como uma técnica importante para a Engenharia de Manutenção, pois, além de estar associada à vida útil destes equipamentos, fornece argumentos para a tomada de decisão quanto a intervenções nos mesmos. Apesar da preocupação com a presença de água em transformadores existir há mais de meio século, o acompanhamento de tal variável ainda é realizado de maneira superficial, considerando-se poucas informações para se apresentar um diagnóstico eficiente, o que pode levar a interpretações equivocadas sobre o equipamento e, consequentemente, a falsos diagnósticos. Tendo em vista tal cenário, este trabalho possui como objetivo a obtenção de um equacionamento que modele curvas clássicas relativas à umidade em transformadores, bem como o desenvolvimento de um modelo matemático que simule o comportamento da migração de água no interior destes equipamentos. Para isso, técnicas computacionais e métodos numéricos são utilizados. Desta forma, a principal contribuição do trabalho é otimizar o processo de diagnóstico supracitado. Durante o trabalho, é realizada uma análise bibliográfica do tema, com posteriores explicações sobre as ferramentas matemáticas utilizadas. Para comprovar a eficácia do projeto apresentado, são realizados estudos de caso com dados obtidos de transformadores energizados. Alguns valores encontrados em outros trabalhos também são utilizados para validar o trabalho. Finalizando com conclusões sobre o exposto, comprova-se que a utilização da abordagem aqui apresentada é eficaz e de fundamental aplicação na área de Engenharia de Manutenção.

Palavras-chave: manutenção, método das diferenças finitas, óleo, papel, programação genética, sistema isolante, transformadores de potência, umidade.

### Abstract

Prediction of moisture levels inside power transformers shown itself as an important technique for maintenance engineering, because in addition to being associated with the useful life of equipment, it also provides arguments for decision making about intervention in them. Despite concerns about water in transformers existed for over half a century, the monitoring of this variable is still done in a simply way, given little information to weave a diagnosis, which can lead to superficial interpretations of equipment, and therefore, the misdiagnosis. Given such a scenario, this work aims to obtain an equation that models classical curves relative to moisture in transformers, as well as the development of a mathematical model that simulates water migration inside these equipments. For this purpose, computational techniques and numerich methods are used. Thus, the main contribution of this work is to optimize the above diagnostic process. During the work a literature review of the subject is presented, with further explanations of the mathematical tools used. To prove the effectiveness of the project presented, case studies with data from energized power transformers are analysed. Some values found in other works are also uses to validate the work. Ending with some conclusions, this paper proves that the use of the approach presented here is effective, and its application is fundamental in the area of maintenance engineering.

Keywords: finite difference method, genetic programming, insulating systems, maintenance, moisture, oil, paper, power transformers.

# Lista de Figuras

| Figura 2.1 - Transformador de potência: (a) vista externa; b) vista da parte ativa   |                |
|--|----------------|
| Figura 2.2 - Trecho do polímero da molécula de celulose.   |                |
| Figura 2.3 - Fotocópia de papel isolante kraft 0,06 mm   |                |
| Figura 2.4 - Amostra de Óleo Isolante.   |                |
| Figura 2.5 - Vasilhames contendo óleo de diversas cores  |                |
| Figura 2.6 - Relação entre rigidez dielétrica e concentração de umidade do óleo isolante   |                |
| Figura 2.7 - Vista detalhada do conjunto óleo-papel-cobre.   | 30             |
| Figura 2.8 - Distribuição de Temperaturas do Enrolamento.  |                |
| Figura 2.9 - Distribuição de Temperaturas do Enrolamento e do Óleo   |                |
| Figura 2.10 - Concentração de Saturação de água em óleo  |                |
| Figura 2.11 - Isoterma de migração de umidade em celulose.   |                |
| Figura 2.12 - Relação entre concentração de água no papel e pressão de vapor de água   |                |
| Figura 2.13 - Curva de Fabre-Pichon.   |                |
| Figura 2.14 - Curva de Oommen  | 39             |
| Figura 2.15 - Equações de cálculo de pressão de vapor da água  |                |
| Figura 2.16 - Medidor de concentração de água em óleo.   | 43             |
| Figura 2.17 - Esferas de sílica-gel saturadas.   | 45             |
| Figura 2.18 - Sistema de conservação de óleo, com destaque para o tanque de expansão e o resp  | irador a       |
| sílica-gel   | 45             |
| Figura 2.19 - Processo de secagem de transformadores utilizando máquina de termo-vácuo: a) C   | 'âmara de      |
| termo-vácuo, b) unidade de controle, c) caminhão baú usado para armazenagem e transporte do  | sistema, d)    |
| filtro-prensa, e e) tanque auxiliar de óleo  | 47             |
| Figura 3.1 - Exemplo de um indivíduo representado na forma de uma árvore   | 52             |
| Figura 3.2 - Exemplo de um indivíduo representado na forma de uma árvore   | 52             |
| Figura 3.3 - Mutação em Programação Genética.  | 53             |
| Figura 4.1 - Curva ajustada de Fabre-Pichon – Vista 01   | 57             |
| Figura 4.2 - Curva ajustada de Fabre-Pichon – Vista 02   | 57             |
| Figura 4.3 - Curva ajustada de Oommen – Vista 01   | 58             |
| Figura 4.4 - Curva ajustada de Oommen – Vista 02   | 58             |
| Figura 4.5 - Vetores Gradiente da Curva Ajustada de Fabre-Pichon   | 59             |
| Figura 4.6 - Vetores Gradiente da Curva Ajustada de Oommen   | 59             |
| Figura 4.7 – Evolução do fitness – Curva de Fabre-Pichon.  | 61             |
| Figura 4.8 - Evolução do fitness – Curva de Oommen.  |                |
|  | 61             |
| Figura 4.9 - População na última geração – Curva de Fabre-Pichon.  | 61<br>62       |
| Figura 4.9 - População na última geração – Curva de Fabre-Pichon<br>Figura 4.10 - População na última geração – Curva de Oommen  | 61<br>62<br>62 |
| Figura 4.9 - População na última geração – Curva de Fabre-Pichon<br>Figura 4.10 - População na última geração – Curva de Oommen<br>Figura 4.11 - Dados Estatísticos – Curva de Fabre-Pichon  | 61<br>62<br>   |
| <ul> <li>Figura 4.9 - População na última geração – Curva de Fabre-Pichon.</li> <li>Figura 4.10 - População na última geração – Curva de Oommen.</li> <li>Figura 4.11 - Dados Estatísticos – Curva de Fabre-Pichon.</li> <li>Figura 4.12 - Dados Estatísticos – Curva de Oommen</li> </ul> |                |

| Figura 4.14 - Predição – Curva de Oommen  | 64    |
|---|-------|
| Figura 4.15 - Pesos dos Genes – Curva de Fabre-Pichon   | 65    |
| Figura 4.16 - Pesos dos Genes – Curva de Oommen   | 65    |
| Figura 4.17 - Segundo Teste – Comparação entre os Ajustes – Curva de Fabre-Pichon                         | 66    |
| Figura 4.18 - Segundo Teste – Comparação entre os Ajustes – Curva de Oommen                               | 67    |
| Figura 5.1 – Diagrama representativo do modelo unidimensional   | 70    |
| Figura 5.2 – Fluxograma de cálculo para o modelo unidimensional   | 72    |
| Figura 5.3 – Janela de inserção de variáveis  | 78    |
| Figura 5.4 – Janela de resultados para o modelo unidimensional  | 79    |
| Figura 6.1 – Diagrama representativo do modelo bidimensional  | 81    |
| Figura 6.2 - Fluxograma de cálculo para o modelo bidimensional  | 83    |
| Figura 6.3 - Condições de contorno temporais para o modelo bidimensional (primeira iteração)              | 84    |
| Figura 6.4 - Tipos de nós do papel, quanto à vizinhança   | 85    |
| Figura 6.5 - Representação do método ADI  | 86    |
| Figura 6.6 - Janela de resultados para o modelo bidimensional   | 92    |
| Figura 7.1 – Variação da temperatura com o tempo no experimento de Zhou                                   | 94    |
| Figura 7.2 – Variação da concentração de água no óleo com o tempo no experimento de Zhou                  | 94    |
| Figura 7.3 - Variação da concentração de água no papel (valor médio) com o tempo no experimento de        | ;     |
| Zhou  | 95    |
| Figura 7.4 – Temperatura usada na comparação com Zhou   | 96    |
| Figura 7.5 – Concentração de água no óleo   | 96    |
| Figura 7.6 – Concentração de água no papel – valor médio  | 97    |
| Figura 7.7 – Relações entre as variáveis de massa e volume nos transformadores em estudo, conforme        |       |
| manuais dos equipamentos  | . 100 |
| Figura 7.8 – Métodos utilizados em campo para amostragem de dados: a) referente à coleta de informaç      | ções  |
| no fundo do transformador - Sensor Hydrocal 1001+ (elipse vermelha) e registro de coleta de óleo para     | Ļ     |
| análise laboratorial (elipse verde); b) referente à coleta de informações no topo do transformador - redu | ção   |
| de coleta de óleo para análise laboratorial   | . 102 |
| Figura 7.9 - Temperaturas na base do transformador  | . 104 |
| Figura 7.10 - Concentração de água no óleo versus tempo   | . 104 |
| Figura 7.11 - Concentração de água no papel ao longo da espessura versus tempo                            | . 105 |
| Figura 7.12 - Concentrações de água no papel nas interfaces versus tempo                                  | . 105 |
| Figura 7.13 - Saturação relativa de água no óleo versus tempo   | . 106 |
| Figura 7.14 - Massas de água no papel e no óleo versus tempo  | . 106 |
| Figura 7.15 - Temperaturas na base do transformador   | . 107 |
| Figura 7.16 - Concentração de água no óleo  | . 108 |
| Figura 7.17 - Saturação relativa de água no óleo  | . 108 |
| Figura 7.18 - Concentração de água no papel, na interface papel-óleo                                      | . 109 |
| Figura 7.19 - Concentração de água no papel, na interface papel-enrolamento                               | . 109 |
| Figura 7.20 - Massa total de Água no Óleo   | . 110 |

| Figura 7.21 - Massa total de Água no Papel  | 110        |
|---|------------|
| Figura 7.22 - Temperaturas do enrolamento e óleo para o Estudo de Caso 2                          | 112        |
| Figura 7.23 - Concentração de água no óleo para o Estudo de Caso 2                                | 113        |
| Figura 7.24 - Saturação Relativa de água no óleo para o Estudo de Caso 2                          | 113        |
| Figura 7.25 - Concentração de água no papel para o Estudo de Caso 2                               |            |
| Figura 7.26 – Massas de água no papel e no óleo para o Estudo de Caso 2                           |            |
| Figura 7.27 – Temperatura do condutor a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de O    | Caso 3 116 |
| Figura 7.28 - Concentração de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento - Estudo    | de Caso    |
| 3   | 116        |
| Figura 7.29 – Saturação relativa de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Es  | tudo de    |
| Caso 3  | 117        |
| Figura 7.30 – Concentração de água no papel a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estud    | o de Caso  |
| 3   | 118        |
| Figura 7.31 – Perfil da concentração de água no óleo para a segunda coleta de dados – Estudo de   | Caso 3118  |
| Figura 7.32 – Perfil da concentração de água no papel para a segunda coleta de dados – Estudo de  | Caso       |
| 3   | 119        |
| Figura 7.33 – Perfil da temperatura no condutor do enrolamento para a segunda coleta de dados –   | Estudo de  |
| Caso 3  | 120        |
| Figura 7.34 – Temperaturas do enrolamento e do óleo – Estudo de Caso 4                            | 121        |
| Figura 7.35 – Concentração de água no óleo – Estudo de Caso 4                                     | 122        |
| Figura 7.36 – Saturação Relativa de Água no Óleo – Estudo de Caso 4                               | 122        |
| Figura 7.37 – Concentração de água no papel – Estudo de Caso 4                                    | 123        |
| Figura 7.38 – Massas de água no óleo e no papel – Estudo de Caso 4                                | 123        |
| Figura 7.39 – Temperatura do condutor a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de O    | Caso 5 124 |
| Figura 7.40 - Concentração de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento - Estudo    | de Caso    |
| 5   | 125        |
| Figura 7.41 – Saturação relativa de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Es  | tudo de    |
| Caso 5  | 125        |
| Figura 7.42 – Concentração de água no papel a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estud    | o de Caso  |
| 5   | 126        |
| Figura 7.43 – Perfil da concentração de água no óleo na terceira coleta de dados – Estudo de Caso | 5 127      |
| Figura 7.44 – Perfil da concentração de água no papel na terceira coleta de dados – Estudo de Cas | o 5 127    |
| Figura 7.45 – Perfil da temperatura do condutor do enrolamento na terceira coleta de dados – Estu | ido de     |
| Caso 5  | 128        |
| Figura 7.46 – Temperaturas do condutor do enrolamento e do óleo – Estudo de Caso 6                | 129        |
| Figura 7.47 – Concentração de água no óleo – Estudo de Caso 6                                     | 129        |
| Figura 7.48 – Saturação relativa de água no óleo – Estudo de Caso 6                               | 130        |
| Figura 7.49 – Concentração de água no papel – Estudo de Caso 6                                    | 130        |
| Figura 7.50 – Massas de água no óleo e no papel – Estudo de Caso 6                                |            |
|   |            |

## Lista de Tabelas e Quadros

| Tabela 2.1 - Constantes para cálculo de solubilidade de água em óleos, conforme CIGRÉ             |     |
|---|-----|
| Tabela 2.2 - Constantes para cálculo de solubilidade de água em óleos, conforme Du e Mamishev     |     |
| Tabela 2.3 - Concentrações de saturação de água em 15000 kg de óleo para temperatura igual a 60ºC |     |
| Tabela 2.4. Parâmetros para o cálculo do coeficiente de difusão                                   |     |
| Quadro 3.1. Pseudo-Código para o Algoritmo de Programação Genética                                | 53  |
| Tabela 4.1 - Resultados das simulações para ajustes de curvas                                     | 60  |
| Tabela 4.2 - Parâmetros de Simulação  | 60  |
| Tabela 4.3 - Teste do Ajuste da Curva de Fabre-Pichon   | 67  |
| Tabela 4.4 - Teste do Ajuste da Curva de Oommen   |     |
| Tabela 7.1 - Dados experimentais do Experimento de Zhou   | 93  |
| Tabela 7.2. Parâmetros usados na simulação  | 95  |
| Tabela 7.3. Comparação numérica com Zhou  | 97  |
| Tabela 7.4 - Características gerais dos transformadores em estudo                                 |     |
| Tabela 7.5 - Parâmetros de simulação para o Estudo de Caso 1                                      |     |
| Tabela 7.6 - Comparação entre simulações  |     |
| Tabela 7.7 - Massas de água no transformador 2 – Estudo de Caso 2                                 | 111 |
| Tabela 7.8 - Massas de água no transformador 2 –Estudo de Caso 3                                  | 115 |
| Tabela 7.9 - Massas de água no transformador 3 – Estudo de Caso 4                                 |     |
| Tabela 7.10. Massas de água no transformador 3 – Estudo de Caso 5                                 |     |
| Tabela 7.11 - Massas de água no transformador 1 – Estudo de Caso 6                                |     |
| Tabela 7.12 - Valores de equilíbrio para o instante inicial                                       |     |
| Tabela 7.13 - Massas de água totais no papel e no óleo  |     |
| Tabela 7.14 - Comparação entre simulações   |     |

# Lista de Abreviaturas e Siglas

| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas                      |
|---------|---|
| ADI     | Alternate Direction Implicit                                  |
| AGD     | Análise de Gases Dissolvidos                                  |
| CELG D  | CELG Distribuição S.A.  |
| CIGRÉ   | Council on Large Electric Systems                             |
| CTransf | CTransf - Carregamento de Transformadores                     |
| DEC     | Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora    |
| FEC     | Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora |
| GPTips  | Genetic Programming & Symbolic Regression for MATLAB          |
| IPE     | Interface Papel-Enrolamento                                   |
| IPO     | Interface Papel-Óleo  |
| Matlab  | Matrix Laboratory   |
| MUSPO   | Monitor de Umidade no Sistema Isolante Papel-Óleo             |
| NaN     | Not a Number  |
| NBR     | Norma Brasileira de Recomendação                              |
| PG      | Programação Genética  |
| ppm     | Partes por milhão   |
| RMS     | Root Mean Square  |
| SIN     | Sistema Interligado Nacional                                  |
| SQR     | Somatório dos Quadrados dos Resíduos                          |
| SR      | Saturação Relativa  |
| TAN     | Total Acid Number   |
| UR      | Umidade Relativa  |

### Lista de Símbolos

Parâmetro para cálculo da Saturação Relativa, conforme CIGRÉ а Α Parâmetro para cálculo da Saturação Relativa, conforme Du b Parâmetro para cálculo da Saturação Relativa, conforme CIGRÉ В Parâmetro para cálculo da Saturação Relativa, conforme Du С Concentração de água no papel  $C_1$ Concentração de água no papel para uma camada completa  $C_m^i$ Concentração de água na célula de papel de coordenada m, na i-ésima iteração  $C_{m.n}^i$ Concentração de água na célula de papel de coordenada (m,n), na i-ésima iteração  $C_{oleo}$ Concentração de água no óleo  $C_{oleo}^{i}$ Concentração de água no óleo na i-ésima iteração  $C_{oleo,n}^{\iota}$ Concentração de água no óleo na n-ésima altura, para i-ésima iteração Concentração de Saturação de Água em Óleo  $C_{oleo,sat}$  $C_{p,i}$ Concentração de Água no Papel conforme ajuste por interpolação  $C_{p,p}$ Concentração de Água no Papel conforme ajuste polinomial  $C_{p,PG}$ Concentração de Água no Papel conforme ajuste por Programação Genética  $C_{p,r}$ Concentração de Água no Papel de referência D Coeficiente de Difusão d Espessura da camada de papel Parâmetro para cálculo do Coeficiente de Difusão  $D_0$  $E_a$ Parâmetro para cálculo do Coeficiente de Difusão f(x)Função J Fluxo de Dispersão de Matéria k Probabilidade de uma molécula de água escapar da zona ativa da celulose т Coordenada no papel ao longo da espessura М Número de discretizações do papel ao longo da espessura Massa total de água no óleo  $m_{H20,o}$ Massa total de água no óleo na i-ésima iteração  $m_{H20,0}{}^{l}$  $m_{H20,p}$ Massa total de água no papel  $m_{H20,p}$ Massa total de água no papel na i-ésima iteração  $m_{H20,t}$ Massa total de água no interior do transformador  $m_{H20,t}$ <sup>l</sup> Massa total de água no interior do transformador na i-ésima iteração Massa total de Óleo no interior do transformador  $m_{oleo}$ Massa total de papel kraft no interior do transformador  $m_{papel}$ Coordenada no papel/enrolamento/óleo ao longo da altura п Ν Número de discretizações do papel/enrolamento/óleo ao longo da altura  $P_n(x)$ Polinômio de Taylor de enésimo grau  $P_{\nu}$ Pressão de Vapor de Água no Papel  $P_{v.sat}$ Pressão de Vapor de Saturação de Água no Papel  $res^2$ Resíduo ao Quadrado Resíduo do Polinômio de Taylor  $R_n(x)$ SQR Somatório dos Quadrados dos Resíduos SR Saturação Relativa UR Umidade Relativa

- $\alpha$  Simplificação de variáveis para o cálculo da massa de água no papel
- $\gamma$  Simplificação de variáveis para o cálculo da massa de água no papel
- $\eta$  Simplificação de variáveis para o cálculo da massa de água no papel
- $\theta$  Temperatura
- $\lambda$  Simplificação de variáveis para o cálculo da massa de água no papel
- au Constante de Tempo de Difusão

# SUMÁRIO

| CAPÍTU      | LO 1 – INTRODUÇÃO   | 20    |
|-------------|---|-------|
| 1.1.        | Sistemas de Energia, Transmissão de Energia e Transformadores de Potência | 20    |
| 1.2.        | Motivação, Objetivo, Justificativa e Contribuições do Trabalho            | 21    |
| 1.3.        | Estruturação da Dissertação   | 23    |
| CAPÍTU      | LO 2 – TEMPERATURA E UMIDADE EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA               | 25    |
| 2.1.        | Elementos constituintes de um Transformador de Potência                   | 25    |
| 2.1         | .1. Interior de Transformadores   | 25    |
| 2.1         | .2. Sistema Isolante - Celulose   | 25    |
| 2.1         | .3. Sistema Isolante – Óleo   | 28    |
| 2.2.        | DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA                | 29    |
| 2.3.        | UMIDADE EM TRANSFORMADORES  | 32    |
| 2.3         | .1. Concentração de água no óleo  | 33    |
| 2.3         | .2. Concentração de água na celulose                                      | 35    |
| 2.3         | .3. Umidade no sistema isolante papel-óleo – condição de equilíbrio       | 37    |
| 2.3         | .4. Umidade no sistema isolante papel-óleo – condição de migração         | 39    |
| 2.4.        | MEDIÇÃO DE UMIDADE EM TRANSFORMADORES                                     | 42    |
| 2.5.        | SECAGEM E PRESERVAÇÃO DO ÓLEO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA              | 44    |
| 2.6.        | Discussões e Conclusões   | 48    |
| CAPÍTU      | I O 3 – MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE           | ł     |
| ENGENHARIA  |   | ,<br> |
|             |   |       |
| 3.1.        | ALGORITMOS HEURÍSTICOS  | 49    |
| 3.2.        | ALGORITMOS EVOLUTIVOS E PROGRAMAÇÃO GENÉTICA                              | 50    |
| 3.2         | .1. Algoritmos Evolutivos   | 50    |
| 3.2         | .2. Programação Genética  | 51    |
| 3.3.        | Equações Diferenciais Parciais e Métodos Numéricos de Solução             | 54    |
| 3.4.        | Conclusões  | 55    |
| CAPÍTU      | LO 4 – PROGRAMAÇÃO GENÉTICA APLICADA AO AJUSTE DOS ÁBACOS DE              |       |
| FABRE-PICHC | N E OOMMEN  | 56    |
| 4.1.        | Resultados  | 56    |
| 4.1         | .1. Equações encontradas para os Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen          | 56    |
| 4.1         | .2. Gráficos das Curvas de Fabre-Pichon e Oommen                          | 57    |
| 4.1         | .3. Parâmetros de Simulação   | 59    |
| 4.1         | .4. Verificação da viabilidade do resultado                               | 66    |
| 4.2.        | Conclusões  | 68    |
| CADÍTU      | Ι Ο 5 - ΜΟΡΕΙ Ο ΠΝΙΡΙΜΕΝSΙΟΝΑΙ ΦΑΡΑ ΜΙGRΑÇÃO DE ÁCUA NO ΡΑΦΕΙ             | 60    |
| Chill       | E = F = F = F = F = F = F = F = F = F =                                   | 09    |

| 5.1.        | Infl   | UÊNCIA DA TEMPERATURA NO MODELO MATEMÁTICO UNIDIMENSIONAL              | 69  |
|-------------|--------|--|-----|
| 5.2.        | ESPH   | ecificações do Modelo  | 70  |
| 5.2         | .1.    | Desenhos   | 70  |
| 5.2         | .2.    | Fluxograma de cálculo para o modelo unidimensional                     | 71  |
| 5.2         | .3.    | Equacionamento no papel  | 73  |
| 5.2         | .4.    | Condições de Contorno  | 74  |
| 5.2         | .5.    | Equacionamento do Óleo   | 76  |
| 5.3.        | IMPI   | EMENTAÇÃO NO SOFTWARE MUSPO  | 77  |
| 5.4.        | CON    | CLUSÕES  | 79  |
| CAPÍTU      | LO 6 - | - MODELO BIDIMENSIONAL PARA MIGRAÇÃO DE ÁGUA NO PAPEL                  | 80  |
| 6.1.        | Con    | SIDERAÇÕES   | 80  |
| 6.2.        | Infl   | UÊNCIA DA TEMPERATURA NO MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL               | 80  |
| 6.3.        | ESPH   | ECIFICAÇÕES DO MODELO  | 80  |
| 6.3         | .1.    | Desenhos   | 80  |
| 6.3         | .2.    | Fluxograma do processo   |     |
| 6.3         | .3.    | Condições de Contorno  |     |
| 6.3         | .4.    | Equacionamento no papel  | 85  |
| 6.3         | .5.    | Conservação da massa de água no transformador e equacionamento no óleo |     |
| 6.4.        | IMPI   | EMENTAÇÃO NO SOFTWARE MUSPO  | 91  |
| 6.5.        | CON    | CLUSÕES  | 92  |
| CAPÍTU      | LO 7 - | - VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS DESENVOLVIDOS, ATRA                | VÉS |
| DE SIMULAÇÔ | ĎES E  | ESTUDOS DE CASO  | 93  |
| 7.1.        | Simu   | jlação 01 - Comparação com o trabalho de Zhou                          | 93  |
| 7.2.        | Aná    | LISES REALIZADAS COM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA – ESTUDOS DE CASO     |     |
| 7.2         | .1.    | Estudo de Caso 1 – Transformador 3, simulação unidimensional           | 102 |
| 7.2         | .2.    | Estudo de Caso 2 – Transformador 2 – Simulação Unidimensional          | 111 |
| 7.2         | .3.    | Estudo de Caso 3 – Transformador 2 – Simulação Bidimensional           | 114 |
| 7.2         | .4.    | Estudo de Caso 4 – Transformador 3 – Simulação Unidimensional          | 120 |
| 7.2         | .5.    | Estudo de Caso 5 – Transformador 3 – Simulação Bidimensional           | 124 |
| 7.2         | .6.    | Estudo de Caso 6 – Transformador 1 – Simulação Unidimensional          | 128 |
| 7.3.        | CON    | CLUSÕES  | 131 |
| CAPÍTU      | LO 8 - | - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS                                    | 135 |
| REFERÊ      | NCIA   | S  | 138 |

### Capítulo 1 – Introdução

 Sistemas de Energia, Transmissão de Energia e Transformadores de Potência

A transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) é feita de forma bastante desafiadora, visto a extensão territorial do país, a diversidade de equipamentos que compõem essa rede elétrica e a necessidade da continuidade do fornecimento de energia para os consumidores. Para este último argumento, é fato que quanto maior a confiabilidade dos equipamentos que compõem o SIN, melhores serão os níveis de qualidade de energia elétrica, como, por exemplo, os expressos pelos índices de qualidade "Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora" (DEC) e "Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora" (FEC) [1].

Os transformadores de potência são elementos de destaque no SIN, pois são responsáveis pela conversão dos diferentes níveis de tensão existentes na transmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, são equipamentos de alto custo e grande porte [2], e falhas nesses equipamentos acarretam grandes períodos de interrupção, o que trazem enormes prejuízos para as empresas distribuidoras de energia. Tais prejuízos são oriundos do lucro cessante com a venda de energia, gastos desnecessários com manutenção de equipamentos, indenização de consumidores que porventura sofram danos materiais e/ou pessoais, bem como multas por parte de agentes reguladores [3]. Assim, as técnicas de manutenção preditiva e monitoramento em transformadores de potência são de suma importância para as concessionárias de energia [2].

Pode-se aplicar técnicas preditivas de manutenção em transformadores de potência estando estes equipamentos em operação ou não. As técnicas preditivas de manutenção que não são invasivas e que não interrompem o fornecimento de energia vêm ganhando destaque, sejam *on-line* ou não. Tal destaque é oriundo da eficácia e características operativas dessas técnicas, mas, principalmente, do retorno financeiro para a empresa, visto que os custos anteriormente citados são reduzidos somente aos gastos com aquisição de instrumentos, logística para utilização destes e treinamento de pessoal. Dentre essas técnicas é possível citar a Detecção Acústica [3], Análise dos Gases Dissolvidos em óleo (AGD) [4] e monitoramento dos níveis de umidade e temperatura do óleo no interior do transformador [5] [6] [7].

Conforme é apresentado adiante, a estimativa de vida de transformadores de potência é

associada à vida útil do papel isolante do mesmo. Os principais agentes de envelhecimento do papel, comprometendo consequentemente a integridade dos transformadores são a umidade e a temperatura [6]. Diferentemente do óleo isolante, que pode ser tratado, regenerado ou substituído, a troca desta isolação de celulose necessita de desmontagem do equipamento e de intervenção nos condutores dos enrolamentos que compõem a parte ativa. Constatando-se este cenário, evidencia-se a importância de se acompanhar a evolução dos níveis de água e temperatura no interior de transformadores, para evitar gastos desnecessários com ocorrências que são possíveis de se antecipar.

### 1.2. Motivação, Objetivo, Justificativa e Contribuições do Trabalho

Frente ao que foi exposto, a motivação desse trabalho é otimizar as técnicas preditivas de manutenção preventiva em transformadores de potência, através da melhoria no acompanhamento dos níveis de umidade no interior destes equipamentos. Devido à sua característica construtiva, a obtenção de informações referentes à quantidade de água no óleo no interior de transformadores é possível de se fazer por meio de alguns pontos deste equipamento, geralmente através de registros para coleta de óleo, localizados nas zonas inferior e superior do equipamento. Assim sendo, de posse dessas informações, a utilização destes valores é fácil, bastando apenas o correto manuseio dessas variáveis, que será obtido na ferramenta aqui descrita.

Os objetivos deste trabalho são:

- a) Apresentar o desenvolvimento e refinamento de uma modelagem matemática que auxiliará o monitoramento do nível de umidade no óleo e permitirá estimar o nível de umidade no papel, bem como calcular o nível da saturação relativa de água no óleo;
- b) Obter um equacionamento matemático que permita modelar curvas consideradas clássicas (ábacos) que relacionam o teor de umidade no papel e no óleo, através da temperatura. Tal equacionamento deve ser de fácil utilização para possibilitar sua utilização em quaisquer aplicações em que for necessário.
- c) Implementar desta modelagem em um programa computacional de gerenciamento da área de engenharia de manutenção de equipamentos de média e de alta tensão, denominado MUSPO Monitor de Umidade em Sistema Papel-Óleo [7]. Tal software foi desenvolvido anteriormente pela equipe de pesquisa, conforme apresentado em [7], [8] e [9], e passou por alterações, de forma a permitir a implementação das técnicas que foram apresentadas anteriormente.

De posse de dados estatísticos e análise de tais dados, observa-se que alguns transformadores sofreram ocorrências de defeito ou falha devido a problemas relacionados com umidade, que por si só enfraquece o sistema dielétrico, bem como propicia a formação de gases no interior do equipamento. O trabalho aqui exposto justifica-se na necessidade pela minimização da quantidade de intervenções corretivas em equipamentos, consequentemente minimizando os gastos associados a interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica, bem como os custos referentes a danos nos próprios equipamentos. Tal redução ocorrerá através da predição de níveis alarmantes de umidade no interior do equipamento.

As principais contribuições dessa dissertação resultaram em dois artigos científicos apresentados em [9] e [8], sendo elas:

- Apresentar novas modelagens matemáticas, para serem implementadas em um programa computacional que contenha o agrupamento de parâmetros de interesse da manutenção preventiva de transformadores em um único sistema, de forma a subsidiar a tomada de decisão por parte da Engenharia de manutenção. Alguns desses parâmetros são: a) nível de umidade no papel; b) nível de umidade no óleo; c) grau de saturação da água no óleo para diferentes temperaturas;
- Otimizar a metodologia de acompanhamento dos níveis de umidade, através da criação de um acoplamento mecânico que permite obter informações sobre temperatura e teor de umidade no óleo considerando a utilização de dois procedimentos diferentes: a) sistema Hydrocal 1001+ [10]; e b) coleta de óleo e armazenamento em seringas de vidro, para posterior análise laboratorial;
- Aprimorar o *software* intitulado MUSPO (Monitoramento de Umidade em Sistema Isolante Papel-Óleo), cujo propósito é servir como interface entre a modelagem aqui descrita, o sistema de aquisição de dados e o usuário final.

Como diferencial deste trabalho, pode-se citar a utilização do método das diferenças finitas na resolução do problema proposto, em especial quando tal método for utilizado no cálculo da migração de umidade em duas dimensões, conforme será descrito no Capítulo 6. Além disso, uma ferramenta da inteligência computacional será usada para auxílio na obtenção do equacionamento das curvas anteriormente citadas. Finalmente, tal trabalho terá aplicação em casos reais, possibilitando o estudo de transformadores de potência de transmissoras e distribuidoras de energia, operando em condições normais e especiais, considerando a dinâmica de temperatura do enrolamento.

### 1.3. Estruturação da Dissertação

Este trabalho é dividido em oito capítulos. A pesquisa bibliográfica sobre o tema é apresentada nos Capítulos 2 e 3. As propostas de modelos matemáticos desenvolvidos nesse trabalho são apresentadas nos capítulos 4 a 6. O Capítulo 7 apresenta uma validação dos dados, e as conclusões são descritas no Capítulo 8. A seguir é feita uma breve descrição dos capítulos.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos básicos sobre transformadores, partes construtivas e distribuição de temperaturas ao longo dos enrolamentos. Além disso, apresenta a teoria de difusão de massa, que modela o processo de migração de umidade no sistema isolante do transformador. Aqui é construída a base teórica que permite a construção e compreensão dos modelos matemáticos a serem apresentados.

A análise bibliográfica é finalizada no Capítulo 3, onde são mostradas algumas técnicas que permitem resolver problemas numéricos através do auxílio de ferramentas computacionais. O objetivo desse capítulo é apresentar as equações matemáticas que possibilitam construir os modelos, usando conceitos teóricos apresentados no Capítulo 2.

No Capítulo 4 é apresentado um procedimento para obtenção de equações inéditas que se comportem conforme gráficos considerados clássicos, que modelam a relação entre a concentração de água no sistema isolante de transformadores e a temperatura interna a esses equipamentos. Além disso, as equações obtidas são comparadas com valores de referência.

O capítulo 5 mostra o primeiro modelo matemático desenvolvido neste trabalho, que serve para auxiliar a compreensão de como a água migra no interior de um transformador conforme a curva de carregamento, dados de projeto e amostras anteriores de óleo isolante. Para isso, utiliza-se dos resultados obtidos no Capítulo 4.

Apesar de outros autores apresentarem uma proposta similar à exibida nesse capítulo (conforme apresentado em [11] e [12], por exemplo), o modelo unidimensional foi desenvolvido com características que o tornam único, quando comparado com a literatura existente. Além disso, ele é necessário por servir de base para o modelo em duas dimensões, considerado principal contribuição deste trabalho.

No Capítulo 6 são relatadas as características que constituem o modelo em duas dimensões para a migração de umidade no sistema isolante de transformadores de potência. Tal modelo bidimensional tem como base o apresentado no Capítulo 5 e 4, bem como em informações de capítulos anteriores. O modelo em duas dimensões da migração de água no interior de transformadores é inédito, quando comparado ao material bibliográfico existente, por permitir a análise do comportamento da umidade ao longo da altura do enrolamento e espessura do papel. O objetivo do Capítulo 7 é apresentar a validação dos modelos desenvolvidos, comparando os resultados obtidos via MUSPO com outros dados considerados de referência, coletados através de outros trabalhos e de amostragem em transformadores de potência energizados.

O capítulo 8, último desta dissertação, retoma tudo o que foi apresentado anteriormente, fechando o trabalho e apresentando conclusões e considerações finais. Também informa quais os principais resultados obtidos, e sugere tópicos de pesquisa para futuros trabalhos.

# Capítulo 2 – Temperatura e Umidade em Transformadores de Potência

Para embasar as atividades desenvolvidas neste trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, conforme apresentado nos itens a seguir.

### 2.1. Elementos constituintes de um Transformador de Potência

#### 2.1.1. Interior de Transformadores

Mostra-se na Figura 2.1 um transformador de potência de 138 kV / 13,8 kV, 33 MVA, em operação (foto à esquerda), bem como a parte ativa de outro transformador, este de 69 kV / 13,8 kV, 20 MVA (foto à direita). Nesta figura, observam-se os enrolamentos e a prensa-culatra, responsável pela compressão de todo o conjunto.

Pode-se simplificar o transformador de potência em um modelo constituído por apenas os enrolamentos, núcleo e o sistema isolante. Existem várias categorias de sistemas isolantes, relacionados ao material usado para isolar o enrolamento e ao tipo de fluido usado como líquido isolante [1]. Por exemplo, pode-se citar transformadores com verniz a seco, com verniz-óleo, aramida e papel-SF<sub>6</sub> (hexa-fluoreto de enxofre). A maioria dos equipamentos de altos níveis de tensão possui como sistema isolante óleo mineral isolante e papel kraft. Assim, esta categoria de isolação é tratada nesse trabalho.

Os enrolamentos são compostos por condutores de cobre ou de alumínio, os quais são envolvidos com papel isolante do tipo *kraft*, estando o conjunto imerso em óleo.

#### 2.1.2. Sistema Isolante - Celulose

Quanto a presença de materiais celulósicos em transformadores de potência, pode-se separá-los em três grandes grupos [5]:

a) Estruturas espessas (doravante denominada madeira): são estruturas usadas com a finalidade de suporte e compressão, como por exemplo tacos de madeira e espaçadores. Compreendem aproximadamente 50% da massa celulósica, e devido a isso, abrigam a maior quantidade de água presente na celulose. Apesar disso, contribuem pouco para a dinâmica de umidade no papel, visto que possuem elevado valor de constante de tempo de difusão.



Figura 2.1 - Transformador de potência: (a) vista externa; b) vista da parte ativa

- (b)
- b) Estruturas finas "quentes" (doravante denominado papel): compreende basicamente o papel *kraft* usado no enrolamento do condutor. Possui essa classificação por trabalhar com os maiores valores de temperatura existentes no transformador (pontos quentes). Apesar de compreender aproximadamente 20% da massa celulósica, é nessa região onde a migração de umidade ocorre de forma mais rápida, visto as altas temperaturas causadas pelos condutores.
- c) Estruturas finas "frias" (doravante denominado papelão): consistem nos materiais celulósicos que operam aproximadamente à temperatura do óleo. Vale ressaltar que as denominações "frio" e "quente" se referem às temperaturas de operação do condutor e do óleo, e não implicam em um valor determinado de temperatura. Os cilindros usados como espaçadores entre bobinas, bem como os isoladores entre bobinas e material metálico não condutor podem ser enquadrados nessa categoria. Os componentes denominados papelão compreendem aproximadamente 30% da massa celulósica total do transformador, e funcionam como principal fonte de água para a migração de umidade no papel e no óleo.

O papel *kraft*, usado no enrolamento dos condutores, é fabricado a partir de uma mistura de fibras de celulose provenientes de polpas de madeira macias [3]. Esse processo fabril garante ao papel resistência mecânica e alta rigidez dielétrica [4]. No processo de isolação do cobre, geralmente são empregadas duas ou três camadas de papel *kraft*, cada camada com espessura de aproximadamente 0,06 mm. É esperado do papel uma rigidez dielétrica mínima de 9 kV/mm, quando a espessura for menor ou igual a 0,20 mm, e um valor de rigidez dielétrica mínimo de 10 kV/mm, para espessuras superiores a 10 kV/mm [13]. Quando imerso em óleo, este valor mínimo sobe para 60,0 kV/mm. É ilustrado na Figura 2.2 [5] o esboço de um trecho do polímero de uma molécula de celulose, onde observa-se que a celulose é uma cadeia de monômeros de glucose. Em cada um desses monômeros existem partes polares, compostas por hidrogênio e hidroxilas.

Figura 2.2 - Trecho do polímero da molécula de celulose.



Fonte: adaptado de [5].

Na Figura 2.3, apresenta-se uma fotocópia de uma amostra de papel *kraft* de 0,06 mm de espessura, comumente usada para isolar enrolamentos de transformadores.



Figura 2.3 - Fotocópia de papel isolante kraft 0,06 mm.

Fonte: adaptado de [5].

#### 2.1.3. Sistema Isolante – Óleo

Por sua vez, o óleo isolante é geralmente de origem mineral (derivado do refino do petróleo) [6] e pode ser classificado como naftênico ou parafínico, sendo o primeiro o mais usado em transformadores de potência. Além disso, há aumento nas pesquisas relativas a óleos de origem vegetal [14], bem como a utilização de nano-partículas magnéticas para otimizar a refrigeração do equipamento [13]. A Figura 2.4 apresenta uma amostra de óleo isolante colhida de um transformador de potência em operação.

Figura 2.4 - Amostra de Óleo Isolante.



Fonte: próprio autor (2016).

Algumas características físico-químicas do óleo mineral considerado próprio para uso, conforme apresentadas em [7] e [15], são:

- Aparência: deve ser claro, límpido e isento de partículas em suspensão ou sedimentadas;
- Densidade mínima a 20°C, para o óleo naftênico: 0,861 kg/L;
- Teor de água máximo: 10 ppm;
- Ponto de Fulgor Mínimo: 140 °C;
- Fator de perdas dielétricas máximo a 100°C: 0,90.
- Rigidez dielétrica mínima: 80 kV/mm;

Na Figura 2.5 são ilustradas diversas amostras de óleo isolante, relacionadas a vários índices de cor. Geralmente, óleos novos apresentam cor transparente (vasilhame mais à esquerda), e óleos regenerados apresentam cor mais amarelada.

A rigidez dielétrica do óleo possui relação direta com a concentração de umidade e o nível de partículas, conforme é apresentado na Figura 2.6 [16].



Figura 2.5 - Vasilhames contendo óleo de diversas cores.

Fonte: adaptado de [16].





Fonte: adaptado de [16].

É ilustrado na Figura 2.7 [16] uma vista ampliada da disposição do sistema enrolamento, papel e óleo. Como o papel apresenta elevada porosidade, é considerado que está embebido em óleo.

### 2.2. Distribuição de temperatura em transformadores de potência

O estudo de temperatura em transformadores de potência é vital, pois considera-se que a

vida útil desse equipamento está diretamente ligada à temperatura que o mesmo está submetido [6].

A temperatura do enrolamento de transformadores de potência sofre variações com o carregamento deste equipamento. Quando uma carga alimentada por um transformador sofre incremento de potência, a corrente que flui nos enrolamentos deste equipamento aumenta e, por conseguinte, aumenta a temperatura nesses enrolamentos, devido à elevação das perdas em carga [6].

A distribuição de temperatura do enrolamento ao longo da altura não é uniforme, e uma das zonas de temperatura de maior destaque é o denominado ponto mais quente do enrolamento. Tal ponto é aquele que possui o maior valor de temperatura em todo o enrolamento e, portanto, o que mais contribui para o envelhecimento do papel.



Figura 2.7 - Vista detalhada do conjunto óleo-papel-cobre.

Fonte: adaptado de [16

Segundo Su [17], a distribuição de temperatura ao longo da altura varia com o carregamento e o projeto de transformadores, mas possui um perfil similar ao apresentado na Figura 2.8. Nesta figura, nota-se que o ponto mais quente não se encontra no topo do enrolamento, mas sim em uma região pertencente entre 80% a 90% da altura total.



Figura 2.8 - Distribuição de Temperaturas do Enrolamento.

Fonte: adaptado de [17].

Ao contrário do enrolamento, o perfil de temperatura do óleo é mais variável, conforme o carregamento e o tipo de refrigeração do transformador. Segundo Nadabi [18], a distribuição de temperatura no enrolamento ao longo da altura pode ser considerada linear, conforme mostrado pela linha na cor marrom da Figura 2.9, destacando que o ponto mais quente possui uma temperatura mais alta do que o ponto no topo do enrolamento através de uma diferença H. A temperatura no óleo também é considerada linear e com inclinação igual à distribuição de temperatura do enrolamento, conforme mostrado pela linha na cor amarela na Figura 2.9 [17]. Nesta figura, o parâmetro g refere-se a um fator que relaciona a temperatura do óleo com a temperatura do enrolamento. O parâmetro H é um fator que relaciona a temperatura do ponto mais quente do enrolamento com a temperatura no topo do enrolamento.

Neste trabalho, por motivos de simplificação, é considerado que as temperaturas do condutor do enrolamento e do óleo seguem a mesma distribuição sugerida por Nadabi.



Figura 2.9 - Distribuição de Temperaturas do Enrolamento e do Óleo.

Fonte: adaptado de [18].

### 2.3. Umidade em transformadores

Conforme apresentado no Capítulo 1, a presença de umidade no interior de transformadores de potência é prejudicial ao equipamento. Um trabalho apresentado pelo CIGRÉ [5] elenca os principais problemas causados pela água nesses ativos:

- a) A presença de umidade acelera o envelhecimento dos materiais celulósicos, como papel e papelão. Como a vida útil do transformador é fortemente relacionada à vida útil do papel, altas concentrações de água causam fim de vida precoce desses equipamentos;
- b) A rigidez dielétrica do sistema isolante fica comprometida com o aumento da saturação relativa do óleo;
- c) Ocorre também a diminuição da força mecânica do papel, visto que ele se torna mais quebradiço; e
- d) A possibilidade de formação de bolhas com o aumento de temperaturas aumenta com a elevação do teor de umidade no equipamento.

Conforme apresentado por Sokolov [19], as principais fontes de acúmulo de água no sistema isolante de transformadores são:

- a) Umidade acumulada nas estruturas maciças de celulose;
- b) Contaminação pela atmosfera; e
- c) Envelhecimento da celulose e do óleo.

Dessa forma, nota-se a importância de se compreender como se comporta a umidade no interior de transformadores. Tal análise é descrita a seguir.

#### 2.3.1. Concentração de água no óleo

As cadeias químicas que compõem os óleos são compostas por componentes aromáticos e impurezas. Além disso, com o envelhecimento deste isolante surgem cadeias polares. Tais elementos se comportam como cargas de polaridades opostas, ou seja, atraem moléculas de água para o óleo. Dessa forma, encontra-se umidade neste meio em duas formas: água dissolvida ou água livre. A grandeza que diferencia esses dois estados é a Saturação Relativa *SR*, calculada conforme a Equação (2.1), onde  $C_{óleo}$  refere-se à concentração de água no óleo. A grandeza  $C_{óleo,sat}$  indica a concentração de saturação de água no óleo, e caso o valor de concentração  $C_{óleo}$  seja maior do que  $C_{óleo,sat}$ , o óleo não consegue mais absorver umidade, e logo haverá formação de água livre.

$$SR = \frac{C_{\acute{o}leo}}{C_{\acute{o}leo,sat}}$$
(2.1)

Existem diversas formas de calcular  $C_{\delta leo,sat}$ . O grupo de estudos do CIGRÉ apresenta a Equação (2.2) [5] que permite calcular a solubilidade da água no óleo a uma dada temperatura  $\theta$ . As constantes *a* e *b* são dependentes da qualidade do óleo mineral, e são apresentadas na Tabela 2.1 [5].

$$C_{\acute{o}leo,sat} = a \cdot e^{-b/\theta} \tag{2.2}$$

ь.

| Tipo de óleo  | а                     | b    |
|---|-----------------------|------|
| 1   | 16,97·10 <sup>6</sup> | 3777 |
| 2   | 24,65·10 <sup>6</sup> | 3835 |
| 3 (óleo envelhecido com TAN <sup>1</sup> igual a 0,49 mg KOH/g) | 1,84·10 <sup>6</sup>  | 2752 |

Tabela 2.1 - Constantes para cálculo de solubilidade de água em óleos, conforme CIGRÉ.

Fonte: adaptado de [5].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> TAN (*Total Acid Number*): parâmetro que mede a qualidade de óleos minerais, indica a quantidade de hidróxido de potássio que é necessária para neutralizar os compostos ácidos do óleo.

Du e Mamishev [20] apresentam a relação apresentada na Equação (2.3), que matematicamente é uma representação alternativa de (2.2), onde novamente A e B são constantes dependentes do tipo de óleo usado, apresentadas na Tabela 2.2 [20]. Vale ressaltar que (2.3) é uma representação alternativa de (2.2), porém os valores de *A* e *B* não são os mesmos de *a* e *b*.

$$\log C_{\delta leo,sat} = A - \frac{B}{\theta}$$
(2.3)

| Tipo de óleo | A               | В    |
|--------------|-----------------|------|
| 4            | 7,42            | 1670 |
| 5            | 7,09            | 1567 |
| 6            | 7,3             | 1630 |
| Fonte: ad    | aptado de [20]. |      |

Tabela 2.2 - Constantes para cálculo de solubilidade de água em óleos, conforme Du e Mamishev.

Um gráfico que mostra o comportamento da concentração de saturação de água no óleo para temperaturas variando de 0°C a 100°C é exibido na Figura 2.10. Da análise desta figura nota-se que óleos envelhecidos (representados pela curva verde), devido à formação de subprodutos com características polares, apresentam valores de concentração de saturação mais altos, ou seja, "absorvem" mais água.

Observa-se que, para temperaturas em torno de 60°C (temperatura média do topo do óleo) e uma massa de óleo de 15000 kg (valor comumente encontrado em transformadores de grande porte), obtém-se valores médio, mínimo e máximo de concentração conforme exibido na Tabela 2.3. Assim, a correta escolha dos parâmetros a ser usado no cálculo de saturação relativa é importante, visto que os valores de  $C_{\acute{o}leo,sat}$  variam muito entre si.

Tabela 2.3 - Concentrações de saturação de água em 15000 kg de óleo para temperatura igual a 60°C.

|              | C <sub>óleo,sat</sub> | Massa de água máxima dissolvida no óleo |
|--------------|-----------------------|---|
| Valor Mínimo | 201,2636 ppm          | 3,0190 kg                               |
| Valor Médio  | 249,8524 ppm          | 3,7478 kg                               |
| Valor Máximo | 473,9074 ppm          | 7,1086 kg                               |



Figura 2.10 - Concentração de saturação de água em óleo

#### 2.3.2. Concentração de água na celulose

Água em materiais celulósicos pode ser encontrada em quatro estados: adsorvida à superfícies; como vapor; como água livre nos microcapilares (regiões onde o óleo isolante não consegue impregnar); e como água livre embebida no papel [21].

A migração de umidade em materiais celulósicos se dá através da difusão, em estruturas porosas, e adsorção, através de trechos polares da molécula de celulose (vide Figura 2.2), formando regiões ativas. Os processos de difusão e adsorção ocorrem em somente uma região ativa por vez, ou seja, as primeiras moléculas de água a entrarem no papel formam a camada cheia completa,  $C_1$ . Após a formação dessa primeira camada, as moléculas seguintes são absorvidas formando novas camadas, porém perdendo força de ligação eletroquímica entre a água e as regiões polares da celulose. Continuando nesse processo, chega-se a um ponto de saturação, onde observa-se que a migração de umidade passa a ocorrer nos microcapilares da celulose (regiões onde o óleo isolante não consegue impregnar). Tal característica é descrita em uma curva denominada isoterma de migração, e é apresentada na Figura 2.11. O comportamento destas isotermas é regido pela Equação (2.4) [5], e o parâmetro k é referente a probabilidade de uma molécula de água escapar de uma zona ativa da celulose. O parâmetro UR significa

umidade relativa no papel, e é calculado através da divisão da pressão de vapor de água pela pressão de saturação de vapor de água, conforme mostrado na Equação (2.5).

$$\frac{C}{C_1} = \frac{k \cdot UR}{(1 - UR) \cdot (1 - UR + k \cdot UR)}$$
(2.4)

$$UR = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \tag{2.5}$$

Observa-se que materiais celulósicos possuem a característica de serem bons adsorventes de umidade, ou seja, possuem elevados valores de k. Também, se nota que à temperatura ambiente o número de camadas de água formadas aproxima a unidade.



Figura 2.11 - Isoterma de migração de umidade em celulose.

Du *et.al.* [20] e Sokolov [19] apresentam um conjunto de equações que servem para modelar a concentração de umidade no papel. As Equações (2.6) e (2.7) são referentes aos estudos
de Fessler e Piper, respectivamente, e relacionam a pressão de vapor de água  $P_{\nu}$  [atm] com a concentração de água no papel C e a temperatura  $\theta$  [°C]. A aplicação de tais equações é ilustrada na Figura 2.12.

$$C = 2,173 \cdot 10^{-7} \cdot P_{v}^{0,6685} \cdot e^{4725,6/(\theta + 273)}$$
(2.6)

$$C = \left(P_{\nu} \cdot e^{-21,92+6850/(\theta+273)}\right)^{0,75}$$
(2.7)

Figura 2.12 - Relação entre concentração de água no papel e pressão de vapor de água.



Fonte: próprio autor (2016)

2.3.3. Umidade no sistema isolante papel-óleo – condição de equilíbrio

Vários pesquisadores criaram ábacos que relacionam as variáveis descritas por meio de métodos experimentais, e duas referências foram consideradas principais: as curvas de Fabre-Pichon, sugeridas na NBR 5416:1997 [22] e apresentadas na Figura 2.13; e as curvas de Oomen [23] apresentadas na Figura 2.14. Ambas as curvas apresentam o teor de água no papel em % (por massa) em função da quantidade de água no óleo em p.p.m. (por volume) e da temperatura da amostra de óleo. Dessa forma, para se descobrir a concentração de água na celulose, basta determinar a concentração de água no óleo e, através da temperatura do óleo, calcular a concentração de água no papel.



Figura 2.13 - Curva de Fabre-Pichon.

A forma de utilização dos Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen é simples. Através de métodos laboratoriais (NBR 10710 [24]) descobre-se a concentração de água no óleo,  $c_{H20,oleo}$ . De posse desse valor e da temperatura da amostra coletada, o analista percorre o ábaco e encontra o valor da concentração de água no papel,  $c_{H20,papel}$ . Tal processo está sujeito a erros de paralaxe, o que pode causar uma interpretação errônea da quantidade de água no papel. Frente a esse cenário, reside um dos objetivos desse trabalho: deseja-se encontrar uma equação que modele o fenômeno apresentado nos Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen. Tal processo é descrito no Capítulo 3.



Se um transformador estiver alimentando o mesmo valor de carga durante um longo período de tempo, o processo de migração de água no sistema papel-óleo entrará em equilíbrio [5]. Essa condição de equilíbrio é caracterizada quando cessa a migração de moléculas de água entre o papel e o óleo; além disso, a concentração de água no papel ao longo de sua espessura torna-se constante, visto que caso haja diferenças de concentração, ocorrerá um processo migratório para equilibrar essa diferença. No equilíbrio, as pressões parciais de vapor da água no óleo e na celulose são iguais. Expressando essa igualdade em termos matemáticos, tem-se que a umidade relativa da água no óleo é igual à umidade relativa da água no papel.

Conforme descrito em [21], a forma de obtenção dos ábacos de Fabre-Pichon e Oommen se baseia na condição de equilíbrio (igualdade de umidade relativa) entre o óleo e o papel. Combinando as curvas apresentadas na Figura 2.10 com as curvas da Figura 2.12 e a equação (2.4), é possível obter o traçado desses ábacos.

2.3.4. Umidade no sistema isolante papel-óleo – condição de migração

Na condição anteriormente estabelecida (transformador alimentando uma carga constante), para se determinar a concentração de água no papel em qualquer ponto, basta utilizar os ábacos de Fabre-Pichon e Oommen. Na prática, a carga suprida por um transformador varia

Figura 2.14 - Curva de Oommen.

com o tempo, atingindo valores máximos e mínimos em determinados horários do dia. Assim, não é possível calcular a quantidade de água no papel ao longo de sua espessura usando os respectivos ábacos [6]. Nessa nova condição de carga variável, os ábacos de Fabre-Pichon e Oomen são válidos apenas para determinar a quantidade de água no papel na interface papelóleo, visto que nessa região a velocidade de convecção do óleo é nula, levando à situação do equilíbrio de umidade.

Caso as condições de equilíbrio não sejam atendidas, ainda ocorre um processo de migração de água no sistema papel-óleo. Nessa situação, a transferência de água é motivada por três forças: o gradiente de concentração de umidade, o gradiente de pressão e o gradiente de temperatura.

Os processos de transferência de massa ocorrem em dois mecanismos: difusão e convecção. A difusão é a situação na qual dois corpos estacionários estão em contato entre si, trocando massa devido a um gradiente de concentração de determinada substância. Na convecção ocorre a transferência de massa devido a um gradiente de temperatura e/ou pressão.

O modelo apresentado nesse trabalho considera apenas o processo difusivo de transmissão de massa, para fins de simplificação. A teoria da difusão de massa, amplamente divulgada em livros técnicos e apresentada em [10] foi utilizada para estudar o processo de difusão de água no interior do papel.

Existem conjuntos de equações que modelam os processos de difusão em sólidos, líquidos e gases. Tais equações são conhecidas como Leis de Fick [10], que são duas. A Primeira Lei indica que o fluxo de dispersão se dará na direção do gradiente de concentração, e é exibida na Equação (2.8), onde *J* é o fluxo de dispersão de matéria [mol/m<sup>2</sup> h], *D* é o coeficiente de difusão [m/h] e *C* é a concentração da espécie que sofrerá o processo de difusão. O operador  $\nabla$  indica o gradiente da concentração.

$$J = -D \cdot \nabla C \tag{2.8}$$

A Segunda Lei de Fick indica que a variação temporal da concentração é relacionada à geometria do problema estudado. É apresentada em (2.9), onde t é a variável tempo e  $\nabla^2$ é o operador laplaciano.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 C \tag{2.9}$$

Existem várias formas de se calcular o coeficiente de difusão *D*. O CIGRÉ [5] apresenta a equação (2.10), sendo  $P_v$  a pressão de vapor de água no papel [mmHg] e *C* a quantidade de água no papel [%], respectivamente. Na equação (2.10), *D* é obtido em [m<sup>2</sup>/h].

$$D = 10,64 \cdot 10^{-12} \cdot P_{\nu} \cdot e^{0,52*C} \tag{2.10}$$

Para calcular a pressão de vapor de água  $P_{\nu}$ , foi utilizada a equação (2.11) [25]. Outra forma é através da inversão das equações (2.6) e (2.7), que originam as equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

$$\ln P_{v} = 22,454 + 1,4495 \cdot \ln C - \frac{6996.7}{T + 273}$$
 (Oommen) (2.11)

$$P_{v} = C^{1,4959} \cdot 9,2683 \cdot 10^{9} \cdot e^{-7069/\theta + 273}$$
 (Fessler) (2.12)

$$P_{v} = C^{4/3} \cdot e^{\left(21,92 - 6850/\theta + 273\right)}$$
(Piper) (2.13)

O traçado do Coeficiente de Difusão *D*, considerando as equações (2.11) a (2.13) para uma temperatura de 60 °C, é ilustrado na Figura 2.15. Nota-se que a equação de Fessler (2.12) sempre retorna um valor maior de pressão de vapor de água do que as outras equações, quando se considera os mesmos valores de temperatura.





Outros autores, como Koch [26] e Li [27] apresentam a Equação (2.14), onde os parâmetros  $D_0$  e  $E_a$  são descritos pela Tabela 2.4. Na equação (2.14), D é obtido em [m<sup>2</sup>/s].

$$D = D_0 \cdot e^{0.5 \cdot C + E_a \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{\theta + 273}\right)}$$
(2.14)

|                         | D <sub>0</sub>                             | Ea     |  |  |  |
|-------------------------|--|--------|--|--|--|
| Papel seco              | $1,34 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{2/s}$      | 8140 K |  |  |  |
| Papel contaminado       | 1,34 · 10 <sup>-13</sup> m <sup>2</sup> /s | 8074 K |  |  |  |
| de óleo                 |  |        |  |  |  |
| Fonte: adaptado de [26] |  |        |  |  |  |

Tabela 2.4. Parâmetros para o cálculo do coeficiente de difusão

Associada a constante de difusão, é possível calcular a constante de tempo de difusão  $\tau$  (Equação (2.15)), que estipula um valor médio de tempo gasto para um sistema em migração de água atingir o equilíbrio. Nessa equação, o parâmetro *d* representa a espessura da camada de papel.

$$\tau = \frac{d^2}{\pi^2 \cdot D} \tag{2.15}$$

Por exemplo, para uma amostra de papel impregnado de óleo com 1 mm de espessura e com *C* igual a 0,5%, a constante de tempo para  $T = 20^{\circ}$ C é aproximadamente 331 horas. Já para  $T=70^{\circ}$ C, essa constante de tempo diminui para aproximadamente 6 horas [21]. Essa enorme diferença de tempo ilustra o porquê de se elevar a temperatura do óleo quando o transformador está sob processo de secagem.

## 2.4. Medição de umidade em transformadores

Existem diversos meios para se medir os níveis de umidade em óleo. Dos métodos laboratoriais existentes, destaca-se a titulação Karl Fischer [8]. Nesse procedimento, uma amostra de óleo é retirada do transformador com o auxílio de vidraria adequada, através de um registro instalado na parte inferior do equipamento. Após a retirada dessa amostra, o óleo colhido é levado para um laboratório e, através do método de Karl-Fischer é possível determinar quantos miligramas de água há em determinada massa de óleo, expressa em quilogramas. Essa relação miligramas / quilogramas é denominada de p.p.m., ou partes por milhão. Na Figura 2.16 é apresentado um equipamento que faz a leitura do teor de umidade em óleo através do método de Karl-Fischer [28]. A NBR 10710:1989 explica em maiores detalhes os fenômenos químicos envolvidos no método. Os compostos químicos citados na referida norma, bem como suas fórmulas químicas, são: iodo ( $I_2$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), piridina ( $C_5H_5N$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), ácido iodídrico (HI), e trióxido de enxofre ( $SO_3$ ) [24].

"O princípio do método se baseia na redução do iodo pelo dióxido de enxofre, em presença de água. Esta redução é quantitativa na presença de piridina e metanol, que reagem com o ácido iodídrico e o trióxido de enxofre produzidos, de acordo com as seguintes equações."

$$H_2 O + I_2 + SO_2 + 3 \cdot C_5 H_5 N - - 2 \cdot C_5 H_5 N \cdot HI + C_5 H_5 N \cdot SO_3 \qquad (2.16)$$

$$C_{5}H_{5}N \cdot SO_{3} + CH_{3}OH - - C_{5}H_{5}N \cdot HSO_{4} \cdot CH_{3}$$
(2.17)



Figura 2.16 - Medidor de concentração de água em óleo.

Fonte: próprio autor (2016)

Além dos métodos laboratoriais, existem outras maneiras de se efetuar a medição dos níveis de umidade em óleo. Dentre essas maneiras, destacam-se a instalação de sensores nos registros do transformador [29] [30]. Geralmente, tais sensores utilizam como interface de medição uma membrana capacitiva de teflon, na qual a constante dielétrica deste elemento capacitivo é função da umidade no óleo que tal sensor está medindo.

# 2.5. Secagem e preservação do óleo em transformadores de potência

Existem diversos meios para controlar umidade em transformadores. Tais mecanismos podem ser divididos em dois grupos: o primeiro grupo é composto por técnicas que visam diminuir a entrada de umidade no interior do transformador, tendo como princípio a redução dos níveis de umidade e impurezas do ar atmosférico que porventura venha a contaminar o óleo isolante. Todo esse conjunto é denominado sistema conservador do óleo, e não possuem como objetivo diminuir a concentração de água já existente no sistema isolante papel-óleo. As principais vantagens desse sistema são o baixo custo e o não desligamento do transformador para operação do sistema. Os principais acessórios utilizados nesse processo são descritos a seguir [5].

- a) Tanque de expansão: contêiner metálico, cujo nível mais baixo geralmente fica acima do topo do tanque principal, e que se comunica com este, através de tubulação. A função do tanque de expansão é permitir a expansão e contração do óleo, provenientes do aumento e diminuição da temperatura.
- b) Respiração livre através de sílica: utiliza de um sistema no qual o ar atmosférico passa por um conjunto de mini esferas de sílica gel, que têm como propósito filtrar as impurezas e secar o ar que entre em contato com óleo. Além disso, esse material possui como característica mudar a cor para indicar o quão saturado se encontra. Após atingir a saturação, pode-se regenerar a sílica-gel colocando-a em estufa a 120°C por 2 a 4 horas [31]. A Figura 2.17 ilustra tal componente do transformador.
- c) Bolsa ou membrana: Acessório de borracha que serve como interface entre o óleo do transformador e a atmosfera, impedindo o contato entre esses dois elementos, porém permitindo a dilatação e contração do óleo;

Na Figura 2.18 é apresentado o sistema de conservação de óleo em transformadores. Observa-se que quando ocorre a utilização de bolsa ou membrana o óleo não entra em contato com a atmosfera, evitando penetração de oxigênio e umidade, que reduzem a deterioração do óleo e da celulose.

Figura 2.17 - Esferas de sílica-gel saturadas.



Figura 2.18 - Sistema de conservação de óleo, com destaque para o tanque de expansão e o respirador a sílica-gel



Em casos de montagens em campo ou em fábrica, ou manutenções corretivas de maior importância, é rotineiramente utilizado um sistema que visa reduzir os níveis de umidade no óleo e no papel, conhecido como máquina de termo-vácuo. O princípio básico desse sistema é através da aplicação de vácuo no interior do transformador, o que acelera a liberação de água do papel, conforme apresentado na Figura 2.11. Além disso, um conjunto de bombas hidráulicas força a circulação do óleo mineral isolante por um conjunto de resistências, que aquecem o óleo a aproximadamente 60°C. Esse fluido aquecido passa no interior do transformador, absorvendo a umidade que está no papel. Posteriormente, esse óleo mais úmido entra em uma câmara de

vácuo, onde um sistema de bicos aspersores força a extração da umidade.

Tal processo de secagem, quando comparado com o sistema de conservação do óleo, tem o inconveniente de necessitar a retirada do transformador de serviço, pois o processo de vácuo pode gerar bolhas de gás de baixa rigidez dielétrica, que podem causar uma falha no equipamento [32]. Outra desvantagem do processo de vácuo é que geralmente o tempo de aplicação deste procedimento é curto (em torno de 24 a 48 horas), quando comparada à constante de tempo de migração de água no papel. A razão deste curto intervalo de tempo é a urgência em se colocar o transformador em serviço. Logo, a água extraída no processo pode corresponder a uma pequena parcela da quantidade total de água no interior do transformador. Na Figura 2.19 são apresentadas fotos de uma das máquinas de termo-vácuo utilizada pela CELG Distribuição S.A., empresa distribuidora de energia elétrica do estado de Goiás.

Outro ponto a ser considerado no processo de secagem de transformadores é a dilatação dos materiais celulósicos, visto que este se expande quando absorve água, e contrai ao expulsar umidade. Dessa forma, poderão surgir deformações no interior do equipamento, que por sua vez poderão causar uma falha, especialmente na ocorrência de curtos.

Considerando a dilatação da celulose com a umidade descrita no parágrafo anterior, outro levantamento que deve ser avaliado é se a aplicação de vácuo, levando o transformador a sair de um nível de pressão para outro, pode danificar o papel. Transformadores mais antigos e mais úmidos tendem a possuir o papel mais frágil e mais quebradiço. Assim, as etapas de vácuo e circulação forçada de óleo podem reduzir a rigidez mecânica e a quantidade de isolante sólido em algumas regiões do equipamento.

Além dos métodos clássicos de secagem e conservação do óleo, apresentados nessa seção, existem tecnologias complementares que auxiliam em tais processos.

Considerando o inconveniente da necessidade do desligamento do transformador para a secagem, apresentado pela máquina exibida na Figura 2.19, a empresa *Velcon Systems* apresenta dispositivos capazes de secar o óleo de transformadores, estando estes equipamentos em operação [33] [34]. Tais dispositivos contam com um jogo de elementos filtrantes, que fazem a secagem e purificação do óleo através de um circuito fechado. Essa técnica é conhecida como remoção contínua da umidade [32]. Além disso, existem também dispositivos capazes de filtrar o óleo de comutadores de tap, conforme apresentado em [35].

Figura 2.19 - Processo de secagem de transformadores utilizando máquina de termo-vácuo: a)
Câmara de termo-vácuo, b) unidade de controle, c) caminhão baú usado para armazenagem e transporte do sistema, d) filtro-prensa, e e) tanque auxiliar de óleo.



(d)

Fonte: adaptado de [36].

# 2.6. Discussões e Conclusões

A base teórica que envolve o assunto expõe conceitos clássicos que são utilizados até hoje. Apesar disso, o comportamento da umidade no interior do transformador em vários pontos específicos é pouco estudado. O que se observa na prática é a dedução de diagnósticos baseados em poucas informações. Tais deduções podem ser falhas, pois um equipamento pode apresentar níveis de umidade e temperatura nas amostras que sejam considerados normais, porém em alguns pontos tais níveis podem ser alarmantes.

As tecnologias existentes para monitorar e tratar a água são eficazes, e são utilizadas de maneira ampla pelas distribuidoras de energia, em especial o método de amostragem e posterior análise laboratorial. Através da análise desses métodos, comprova-se a importância em se monitorar a umidade (que é uma técnica de baixo custo), quando comparada à secagem de transformadores (que geralmente possui custos mais elevados).

# Capítulo 3 – Métodos Computacionais para a Resolução de Problemas de Engenharia

## 3.1. Algoritmos Heurísticos

A principal busca das Engenharias e Ciências Exatas, de uma forma geral, é a resolução de problemas. Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem tal propósito é uma prática constante na pesquisa.

Dos vários métodos que existem para resolução de problemas, as Metaheurísticas são técnicas que ganham destaque, devido à enorme variedade de métodos para a resolução de problemas. Conforme Brownlee [37], "os Algoritmos Heurísticos, ou Metaheurísticas, são algoritmos que procuram soluções boas o bastante para um problema, sem se preocupar em verificar se essa solução encontrada é a ótima do problema". Já Lieberman [38] diz que "um método heurístico é um procedimento que provavelmente encontrará uma excelente solução viável, mas não necessariamente uma solução ótima para o problema específico em questão".

Uma das principais características dos algoritmos heurísticos é que não é necessário conhecer o comportamento do problema para resolvê-lo. Por exemplo, para se encontrar o máximo de uma função linear, é possível utilizar dois métodos.

- Algoritmo *simplex*: técnica matemática que busca o ponto ótimo de uma forma aleatória, porém dirigida. Essa técnica não será abordada nesse trabalho e pode ser consultada em [38]; e
- Algoritmo *Hill-Climbing*: técnica que busca aleatoriamente um ponto próximo do ótimo.

Apesar da vantagem de não precisar conhecer mais a fundo o comportamento do problema, os algoritmos heurísticos possuem como desvantagem o fato de que o ponto encontrado, considerado ótimo pelo algoritmo, pode não ser suficientemente bom para a resolução do problema. Assim, a utilização de algoritmos heurísticos é recomendada para problemas que não são resolvidos através de métodos tradicionais.

Pode-se dividir os algoritmos heurísticos em vários grupos, conforme suas características. Uma divisão apresentada por Brownlee [37] é apresentada a seguir.

> Algoritmos Estocásticos: trabalham com a introdução da randomicidade nos métodos heurísticos;

- b) Algoritmos Evolucionários: são inspirados na evolução através da seleção natural;
- c) Algoritmos Físicos: são algoritmos espelhados em sistemas físicos e sociais;
- Algoritmos Probabilísticos: focam em métodos para construção de modelos e estimar distribuições em espaços de busca;
- e) Algoritmos de Enxame: trabalham com as vantagens da inteligência coletiva de vários indivíduos;
- f) Algoritmos Imunológicos: inspirados no sistema adaptativo de imunidade dos vertebrados.

A seção seguinte apresenta em maiores detalhes os Algoritmos Evolucionários e exibe um exemplo desses algoritmos, que é utilizado nesse trabalho.

# 3.2. Algoritmos Evolutivos e Programação Genética

#### 3.2.1. Algoritmos Evolutivos

Dentre as categorias anteriormente apresentadas, destacam-se os Algoritmos Evolucionários. Tais algoritmos são baseados em conceitos de Biologia, em especial a teoria da evolução, proposta por Charles Darwin, e a teoria da genética, estudada primeiramente por Gregor Mendel. Dessa forma, a interação existente entre indivíduos de uma mesma espécie na natureza serve de inspiração para a interação entre uma série de propostas de soluções para o problema. Assim como na natureza, tais propostas de soluções são submetidas a conceitos de evolução e de genética.

A teoria da evolução, estudada por Charles Darwin, propõe que "na natureza todos os indivíduos dentro de um ecossistema competem entre si por recursos limitados, tais como comida e água. Aqueles dentre os indivíduos [...] de uma mesma espécie que não obtêm êxito tendem a ter uma prole menor, e esta descendência reduzida faz com que a probabilidade de ter seus genes propagados ao longo de sucessivas gerações seja menor, processo este que é denominado de seleção natural" [39]. Aplicando tal conceito à computação e à solução de problemas, as propostas de solução que possuem melhor avaliação têm mais chances de gerar filhos, perpetuando sua característica genética e "sobrevivendo" à seleção natural.

Nos estudos de Mendel, citados por Linden [39], observa-se que o gene é uma "unidade básica de informação". O conjunto de genes é chamado de genótipo, e se refere às características do indivíduo. Por sua vez, a forma como uma sociedade enxerga um indivíduo é denominada fenótipo.

Conforme apresentado por Linden [39], a maneira que indivíduos garantem a continuidade de seu material genético é através da reprodução. Existem dois tipos de reprodução: assexuada e sexuada. Na reprodução sexuada, dois indivíduos genitores combinam seu material genético para gerar uma prole. O material genético dessa prole é uma combinação dos genótipos dos indivíduos genitores. Já a reprodução assexuada demanda apenas um genitor, e por consequência, o genótipo do filho e do pai são iguais.

A variabilidade genética que acontece na reprodução sexuada pode se mostrar interessante, pois genitores que não possuem boa aptidão para sobrevivência podem gerar um filho que tenha aptidão excelente. No caso da solução de problemas, duas propostas de solução que não são consideradas boas podem combinar entre si e gerar uma proposta melhor do que as originais, talvez até considerada ótima para o problema.

O que pode causar variabilidade genética em indivíduos advindos da reprodução assexuada é o fenômeno da mutação. Nesse fenômeno, o meio ambiente pode alterar um trecho do genótipo de um indivíduo, de forma aleatória. Assim como na reprodução sexuada, essa alteração do genótipo pode se mostrar interessante.

Alguns exemplos de Algoritmos Evolucionários [38] são: Algoritmos Genéticos, Programação Genética, Evolução Diferencial e Programação Evolutiva. Este trabalho aborda a seguir, em maiores detalhes, o algoritmo Programação Genética.

## 3.2.2. Programação Genética

O algoritmo de Programação Genética (ou algoritmo de PG) é um exemplo de Algoritmo Evolucionário, e foi primeiramente estudado por John Koza [40]. O algoritmo de Programação Genética trabalha com a idéia de que indivíduos com determinado genótipo interagem entre si em uma população, através da reprodução. Além disso, o conceito de mutação está presente no algoritmo de PG.

A principal característica dos algoritmos de Programação Genética é que os indivíduos são estruturas de dados denominadas árvores, onde a leitura de cada árvore indica o genótipo de cada indivíduo. Para a construção das árvores, podem ser usados constantes e/ou funções. Dessa forma, o genótipo de cada indivíduo é uma equação matemática. Por exemplo, o indivíduo mostrado na Figura 3.1 indica a expressão  $A/B^2$ .



Figura 3.1 - Exemplo de um indivíduo representado na forma de uma árvore.

Fonte: próprio autor (2016)

A reprodução em Programação Genética ocorre conforme o princípio da reprodução sexuada: quando dois indivíduos com genótipos diferentes se reproduzem, seus filhos terão como material genético uma combinação do genótipo dos pais. Tal processo é exemplificado pela Figura 3.2, onde se nota a presença do ponto de corte, que é representado por barras pretas cortando as arestas da árvore. As árvores relativas aos filhos são combinações de trechos das árvores dos pais.

Figura 3.2 - Exemplo de um indivíduo representado na forma de uma árvore.



Fonte: próprio autor (2016)

O processo de mutação ocorre da seguinte maneira: para um indivíduo escolhido, no caso uma árvore, um determinado trecho de informação genética pode ser alterado de forma aleatória. Por exemplo, o indivíduo mostrado na Figura 3.3 sofre uma mutação, assim o nó que representa o operador de multiplicação é alterado para um nó que representa o operador de adição. Dessa forma, a equação matemática que o indivíduo representa também sofre alteração. No exemplo, a alteração é de  $A/B^2$ .para  $A/B \cdot 2$ .

Figura 3.3 - Mutação em Programação Genética.



Fonte: próprio autor (2016)

Um pseudo-código que implementa o algoritmo de Programação Genética é exibido no Quadro 3.1.

# Quadro 3.1. Pseudo-Código para o Algoritmo de Programação Genética

INICIALIZE UMA POPULAÇÃO ALEATÓRIA DE ÁRVORES
ENQUANTO NÃO ATENDER O CRITERIO DE PARADA, REPITA
AVALIE A POPULAÇÃO DE ÁRVORES
SELECIONE OS PAIS
APLIQUE O OPERADOR DE REPRODUÇÃO
SELECIONE SOBREVIVENTES
GERE NOVA POPULAÇÃO
FIM REPITA

## 3.3. Equações Diferenciais Parciais e Métodos Numéricos de Solução

Diversos fenômenos da natureza são modelados por equações diferencias, que são equações onde o operador diferencial está presente. Tal operador matemático traz o significado de que o valor de uma variável depende da taxa de crescimento ou decrescimento de outra [41].

Em análise numérica, uma ferramenta muito utilizada é a da Série de Taylor, que permite predizer o valor de uma função em um ponto usando da própria função e de suas derivadas em outro ponto, preferencialmente vizinho ao ponto original [42]. A Série de Taylor diz que podese aproximar uma função f(x) em um ponto x usando um outro ponto vizinho  $x_0$  através da Equação (3.1). Nesta equação,  $P_n(x)$ (calculado através da Equação (3.2) é denominado polinômio de Taylor de enésimo grau e  $R_n(x)$  é o resto, ou erro de truncamento (obtido usando (3.3)). Tomando-se n tendendo ao infinito, o polinômio de Taylor passa a se chamar Série de Taylor, e permite efetuar o cálculo anteriormente descrito sem erros de truncamento.

$$f(x) = P_n(x) + R_n(x)$$
 (3.1)

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \frac{d^k f(x)}{dx^k} (x - x_0)^k = f(x_0) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{1}{2} \Delta x^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \cdots$$
(3.2)

$$R_n(x) = \frac{1}{(n+1)!} \frac{d^k f(\varepsilon(x))}{dx^k} (x - x_0)^{n+1}$$
(3.3)

Tomando-se o caso de n igual a 1 na Equação (3.2), é possível obter uma Equação da Diferença de Primeira Ordem. Dependendo de quais vizinhos sejam considerados, a equação de diferença de primeira ordem é chamada regressiva (caso em que o vizinho é um ponto anterior ao ponto de origem) ou progressiva (o ponto vizinho é maior que o ponto original). Tais equações são mostradas respectivamente em (3.4) e (3.5). Tais equações permitem aproximar o valor de uma derivada em um ponto usando o valor da função em pontos vizinhos

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{i-\frac{1}{2}} = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h}.$$
(3.4)

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{i+\frac{1}{2}} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h}.$$
(3.5)

Também é possível calcular o valor de uma derivada em um ponto usando valores de x antes e depois do ponto original. Tal método é chamado de Equação de Diferença de Primeira Ordem Central, e é apresentada em (3.6).

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{i} = \left. \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2 \cdot h}. \right.$$
(3.6)

Observando que a derivada segunda é a derivada da derivada de primeira ordem [43], obtém-se a Equação de Diferença de Segunda Ordem, obtida e apresentada em (3.7)

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2}\Big|_{i} = \frac{\frac{df(x)}{dx}\Big|_{i+1/2} - \frac{df(x)}{dx}\Big|_{i-1/2}}{\Delta x} = \frac{f(x_{i+1}) - 2 \cdot f(x_i) + f(x_{i-1})}{\Delta x^2}$$
(3.7)

As Equações (3.1) a (3.7) podem ser usadas em qualquer equação que modele um fenômeno da natureza, e permitem calcular valores de grandezas para diversos casos. Por exemplo, o estudo de resfriamento de um elemento combustível de um reator nuclear pode ser usando aplicando as equações anteriormente descritas à equação de condução do calor [44].

Para o problema apresentado neste trabalho, os fenômenos são modelados usando as equações apresentadas anteriormente, através do método conhecido como diferenças finitas.

#### 3.4. Conclusões

Os métodos computacionais se mostram uma ferramenta eficaz para a resolução de problemas de Engenharia. Para este trabalho, a Programação Genética é utilizada para o ajuste de curvas, visto que nem o formato das equações que modelam o fenômeno é conhecido. Além disso, o método das diferenças finitas será utilizado na solução iterativa do problema a ser apresentado no Capítulo 4, por propiciar fácil modelagem.

# **Capítulo 4 – Programação Genética aplicada ao ajuste dos Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen**

Para se fazer o ajuste dos Ábacos exibidos nas Figuras 2.12 e 2.13, optou-se em usar a técnica de Programação Genética, visto que o formato das equações que modelam as curvas não é conhecido. Dessa forma é necessário descobrir o formato do equacionamento que rege o comportamento dos Ábacos, bem como os coeficientes que multiplicam tal equacionamento. Dado um conjunto de dados colhidos da curva, o algoritmo de Programação Genética (PG) busca encontrar propostas de soluções que possuam o menor valor possível do somatório dos quadrados dos resíduos.

Para descobrir tais propostas de soluções, pontos foram colhidos usando o *software* Inkscape [45], conforme foi realizado por Sousa [7]. Tais pontos servirão como dados de treinamento para o algoritmo de PG.

Devido à dificuldade de implementação de um algoritmo de Programação Genética, optou-se em usar a ferramenta GPTIPS [46], que é uma *toolbox* aberta de programação genética, desenvolvida para o ambiente Matlab [47]. Tal ferramenta é intuitiva de se usar e permite configuração de diversos parâmetros de execução do algoritmo PG.

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Equações encontradas para os Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen

Baseado nas informações supracitadas, foram feitos vários testes usando algoritmo de PG para encontrar uma equação para os Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen. Após gerar várias simulações, testando vários parâmetros diferentes, resultados foram encontrados. As Equações (4.1) e (4.2) apresentam as equações geradas pela simulação do algoritmo PG no GPTIPS, e modelam o comportamento dos Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen, respectivamente. Nas equações, as variáveis *C*,  $C_{óleo}$  e  $\theta$  se referem, respectivamente, à quantidade de água no papel (em %), à quantidade de água no óleo (em ppm) e à temperatura da amostra de óleo, em graus Celsius.

$$C = 0,5718 \cdot \frac{C_{\acute{o}leo} + e^{e^{0,169258 - \theta}}}{e^{\frac{\theta}{20,602539}}} + 0,7057$$
(4.1)

$$C = 434,0340 \cdot \frac{C_{\acute{o}leo}}{_{53,832240} \cdot C_{\acute{o}leo} + \theta^2 + 148,8038902} + 0,2332 \tag{4.2}$$

### 4.1.2. Gráficos das Curvas de Fabre-Pichon e Oommen

Nas Figuras 4.1 e 4.2 tem-se duas vistas do traçado tridimensional da Equação (4.1). Por sua vez, são exibidas nas Figuras 4.3 e 4.4 gráficos referentes à Equação (4.2). Como tais figuras são traçados de equações, doravante serão chamadas Curva de Fabre-Pichon e Curva de Oommen, em oposição aos ábacos de Fabre-Pichon e Oommen, exibidos nas Figuras 2.13 e 2.14.



Figura 4.1 - Curva ajustada de Fabre-Pichon - Vista 01

Figura 4.2 - Curva ajustada de Fabre-Pichon – Vista 02



Fonte: próprio autor (2016)



Figura 4.3 - Curva ajustada de Oommen - Vista 01

Figura 4.4 - Curva ajustada de Oommen - Vista 02



Fonte: próprio autor (2016)

Um estudo interessante a se fazer sobre as Curvas é sobre o comportamento da região do maior valor de concentração de água no papel, mostrada em vermelho nas Figuras 4.1 e 4.2. A Curva de Fabre-Pichon apresenta um comportamento linear na região de máximo, ao passo que a Curva de Oommen apresenta uma característica que a aproxima de uma função com concavidade, conforme mostrado nas Figuras 4.3 e 4.4. O traçado dos vetores gradiente das respectivas curvas, que auxiliam na compreensão dessa característica, são exibidos nas Figuras 4.5 e 4.6.



Figura 4.5 - Vetores Gradiente da Curva Ajustada de Fabre-Pichon

Figura 4.6 - Vetores Gradiente da Curva Ajustada de Oommen



Fonte: próprio autor (2016)

## 4.1.3. Parâmetros de Simulação

É mostrado na Tabela 4.1 o número de nós e o somatório dos resíduos (*fitness*) para as árvores que originaram as Equações (4.1) e (4.2). O *fitness* é calculado através da soma das diferenças entre os valores considerados para o ajuste de curva e a resposta que a equação obtida por PG fornece.

| Parâmetro     | Fabre-Pichon | Oommen  |  |  |
|---------------|--------------|---------|--|--|
| Número de Nós | 12           | 11      |  |  |
| Fitness       | 0,27105      | 0,25773 |  |  |

Tabela 4.1 - Resultados das simulações para ajustes de curvas

Os parâmetros escolhidos da melhor simulação para cada curva são apresentados na Tabela 4.2. Nessa tabela, observa-se que os parâmetros foram agrupados em 5 grandes classes: a) a classe "Execução" se refere a parâmetros de execução do algoritmo de programação genética; b) a classe "Árvore" indica parâmetros relativos a construção das árvores durante a execução do algoritmo; c) "Seleção" trabalha com parâmetros de seleção; d) "Operadores" está relacionado com a probabilidade de ocorrência de cada operador genético; e) Finalmente, "Constantes" se refere a criação de constantes durante o texto.

|              | Dados de Simulação                   | Fabre-Pichon | Oommen   |
|--------------|--------------------------------------|--------------|----------|
|              | Número de Gerações                   | 2000         | 2000     |
| —<br>Б ~     | Tamanho da População                 | 2000         | 2000     |
| Execuçao —   | Quantidade de dados de treinamento   | 110          | 110      |
|              | Quantidade de dados de teste         | 55           | 55       |
|              | Profundidade Máxima                  | 10           | 10       |
| Árvore –     | Número Máximo de Nós                 | 12           | 12       |
|              | Profundidade Máxima das Subárvores   | 4            | 4        |
|              | Método de Seleção                    | Torneio      | Torneio  |
| Seleção      | Tamanho do Torneio                   | 20           | 20       |
|              | Parcela de Elitismo                  | 5%           | 5%       |
|              | Probabilidade de Mutação             | 5,00%        | 5,00%    |
| Operadores   | Probabilidade de Crossover           | 90%          | 90%      |
|              | Probabilidade de Cópia Direta        | 5%           | 5%       |
| 0 4 4        | Faixa de Criação de Constantes       | [-50 50]     | [-50 50] |
| Constantes — | Probabilidade de Adição de Constante | 40%          | 40%      |

Tabela 4.2 - Parâmetros de Simulação

A evolução do *fitness* do melhor indivíduo ao longo das gerações é exibido nas Figuras 4.7 e 4.8. Os valores apresentados no eixo das ordenadas são numericamente iguais ao logaritmo, em base 10, do *fitness* do melhor indivíduo. Tal operação matemática foi feita para se ter noção de grandeza do valor do somatório dos mínimos quadrados.



Figura 4.7 – Evolução do *fitness* – Curva de Fabre-Pichon.

Figura 4.8 - Evolução do *fitness* – Curva de Oommen.



Fonte: próprio autor (2016)

Por sua vez, a população na última geração é representada pelas Figuras 4.9 e 4.10. O eixo das ordenadas representa o *fitness*, e o eixo das abscissas representa o número de nós que

cada indivíduo (árvore) possui. Os pontos em verde são propostas de solução consideradas ótimas conforme a Frente de Pareto, que é uma região de pontos considerados ótimos, que possuem como característica possuir o menor valor de Fitness, menor número de nós ou ambos. O ponto em verde com extremidade em vermelho representa o melhor indivíduo da solução. Os demais pontos, em azul, são propostas de solução que não são consideradas ótimas.





Figura 4.10 - População na última geração – Curva de Oommen.



Fonte: próprio autor (2016)

A diferença entre os pontos teóricos (pontos que foram colhidos das Curvas), em azul, e os pontos calculados pelas Equações (4.1) e (4.2), em vermelho, é indicada nas Figuras 4.11 e 4.12. Os gráficos superiores se referem aos dados de treinamento, que serviram para a simulação da PG. Já os gráficos inferiores são referentes a dados de teste, que consistem de dados que são aplicados nas equações obtidas pelo algoritmo de PG.



Figura 4.11 - Dados Estatísticos - Curva de Fabre-Pichon





Fonte: próprio autor (2016)

A informação apresentada nas Figuras 4.13 e 4.14 é semelhante às Figuras 4.11 e 4.12 e representa a diferença entre os valores teóricos e os valores calculados, em uma reta de inclinação unitária. Em uma situação ideal, os valores teóricos são numericamente iguais aos valores calculados (ambos representados por um círculo azul), e ambos se encontram em cima dessa reta unitária. No caso real, quanto maior a distância entre cada círculo azul para a reta, pior o ajuste.



Figura 4.13 - Predição – Curva de Fabre-Pichon

Figura 4.14 - Predição - Curva de Oommen



A contribuição de cada gene para o resultado final da equação obtida é ilustrada nas Figuras 4.15 e 4.16. Os termos Bias e Gene 1 são referentes ao termo independente e à árvore encontrada na simulação, respectivamente.



Figura 4.15 - Pesos dos Genes - Curva de Fabre-Pichon



Figura 4.16 - Pesos dos Genes - Curva de Oommen



Fonte: próprio autor (2016)

#### 4.1.4. Verificação da viabilidade do resultado

Sousa [7] apresenta dois ajustes para os Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen, usando os métodos de interpolação linear e um ajuste polinomial de grau 5. De forma a se comparar os resultados fornecidos pelas equações 4.1 e 4.2 com os ajustes mostrados em [7], foram construídas duas planilhas, mostradas nas Tabelas 4.3 e 4.4. Tais tabelas se referem aos Ábacos de Fabre-Pichon e Oommen, respectivamente. Na construção de tais tabelas, pontos foram colhidos de forma aleatória usando o software Inkscape [45]. A utilização de tal ferramenta é baseada na proporcionalidade da distância entre valores nos Ábacos e sua distância, em pixels. Após essa coleta de dados, quatro valores foram comparados: valor coletado e considerado como referência ( $C_{p,r}$ ), valor obtido pelo ajuste polinomial ( $C_{p,p}$ ), valor obtido por interpolação ( $C_{p,i}$ ) e valor obtido pela PG ( $C_{p,PG}$ ) (Equações (4.1) e (4.2)). Para cada tipo de ajuste foi calculado o quadrado do resíduo  $(res^2)$ , que é numericamente igual à diferença entre o valor coletado e o valor obtido por determinado ajuste, elevado ao quadrado. Na última linha da tabela, encontrase o SQR (Somatório dos Quadrados dos Resíduos), e que é calculado simplesmente somando os valores obtidos nos campos  $res^2$  associados a cada tipo de ajuste. Conforme apresentado por Sousa [7], o ajuste por interpolação só funciona dentro de uma determinada faixa. Quando o ponto coletado se encontra fora dessa faixa, o valor retornado pelo ajuste é NaN (Not a Number, ou não é um número). Informação similar à exibida nas Tabelas 4.3 e 4.4 é ilustrada nas Figuras 4.17 e 4.18.



Figura 4.17 - Segundo Teste – Comparação entre os Ajustes – Curva de Fabre-Pichon.

Fonte: próprio autor (2016)



Figura 4.18 - Segundo Teste – Comparação entre os Ajustes – Curva de Oommen.

Fonte: próprio autor (2016)

| С  | θ   | <i>C</i> <sub><i>p</i>,<i>r</i></sub> | <i>C</i> <sub><i>p</i>,<i>p</i></sub> | $res^2$ | $C_{p,i}$ | $res^2$ | C <sub>p,PG</sub> | res <sup>2</sup> |
|----|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|-----------|---------|-------------------|------------------|
| 0  | 0   | 0                                     | 2,2416                                | 5,0249  | 0,0000    | 0,0000  | 2,5748            | 6,6296           |
| 3  | 20  | 1,5                                   | 1,2753                                | 0,0505  | 1,4366    | 0,0040  | 1,5721            | 0,0052           |
| 4  | 40  | 1,8                                   | 0,8857                                | 0,8359  | 0,8111    | 0,9778  | 1,1159            | 0,4680           |
| 5  | 10  | 3                                     | 2,9551                                | 0,0020  | 3,0801    | 0,0064  | 2,8173            | 0,0334           |
| 5  | 20  | 2                                     | 1,8490                                | 0,0228  | 2,0361    | 0,0013  | 2,0053            | 0,0000           |
| 10 | 30  | 2,2                                   | 2,2209                                | 0,0004  | 2,1711    | 0,0008  | 2,1721            | 0,0008           |
| 10 | 100 | 0,4                                   | 0,3037                                | 0,0093  | 0,3219    | 0,0061  | 0,7548            | 0,1259           |
| 15 | 80  | 0,8                                   | 0,8191                                | 0,0004  | 0,7877    | 0,0002  | 0,8941            | 0,0088           |
| 17 | 40  | 2,3                                   | 2,3563                                | 0,0032  | 2,2395    | 0,0037  | 2,1825            | 0,0138           |
| 20 | 30  | 3,5                                   | 3,5190                                | 0,0004  | 3,5859    | 0,0074  | 3,5052            | 0,0000           |
| 20 | 50  | 1,8                                   | 1,9765                                | 0,0311  | 1,8304    | 0,0009  | 1,7661            | 0,0011           |
| 25 | 40  | 3                                     | 2,9279                                | 0,0052  | 2,9717    | 0,0008  | 2,8389            | 0,0260           |
| 26 | 65  | 1,7                                   | 1,5523                                | 0,0218  | 1,6203    | 0,0064  | 1,3640            | 0,1129           |
| 30 | 60  | 1,9                                   | 1,8966                                | 0,000   | 1,9391    | 0,0015  | 1,6691            | 0,0533           |
|    |     |                                       | SQR                                   | 6,1072  | SQR       | 1,0206  | SQR               | 7,6314           |

Tabela 4.3 - Teste do Ajuste da Curva de Fabre-Pichon

| С  | θ   | $C_{p,r}$ | <i>Cp</i> , <i>p</i> | res <sup>2</sup> | <i>C</i> <sub><i>p</i>,<i>i</i></sub> | res <sup>2</sup> | C <sub>p,PG</sub> | res <sup>2</sup> |
|----|-----|-----------|----------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 0  | 0   | 0         | 1,7390               | 3,0242           | NaN                                   | NaN              | 0,2332            | 0,0544           |
| 3  | 20  | 2,3       | 2,1298               | 0,0290           | 2,2377                                | 0,0039           | 2,0664            | 0,0546           |
| 4  | 40  | 1,4       | 1,3615               | 0,0015           | 1,3880                                | 0,0001           | 1,1171            | 0,0800           |
| 5  | 10  | 4         | 4,0526               | 0,0028           | 4,0396                                | 0,0016           | 4,4230            | 0,1789           |
| 5  | 20  | 3         | 2,9288               | 0,0051           | 3,0017                                | 0,0000           | 2,8863            | 0,0129           |
| 10 | 30  | 3,1       | 3,2525               | 0,0233           | 3,1317                                | 0,0010           | 2,9679            | 0,0174           |
| 10 | 100 | 0,3       | 0,3524               | 0,0027           | 0,3594                                | 0,0035           | 0,6393            | 0,1151           |
| 15 | 80  | 1         | 0,9148               | 0,0073           | 0,9581                                | 0,0018           | 1,1182            | 0,0140           |
| 17 | 40  | 3,2       | 3,1432               | 0,0032           | 3,1676                                | 0,0010           | 3,0030            | 0,0388           |
| 20 | 30  | 4,5       | 4,6785               | 0,0318           | 4,6181                                | 0,0139           | 4,3174            | 0,0334           |
| 20 | 50  | 2,5       | 2,5498               | 0,0025           | 2,6188                                | 0,0141           | 2,5633            | 0,0040           |
| 25 | 40  | 4         | 3,8477               | 0,0232           | 3,9566                                | 0,0019           | 3,7396            | 0,0678           |
| 26 | 65  | 2         | 1,9623               | 0,0014           | 1,9859                                | 0,0002           | 2,1878            | 0,0353           |
| 30 | 60  | 2,5       | 2,4420               | 0,0034           | 2,4665                                | 0,0011           | 2,6608            | 0,0259           |
| 35 | 110 | 0,5       | 0,7993               | 0,0896           | NaN                                   | NaN              | 1,3081            | 0,6530           |
| 38 | 62  | 2,5       | 2,6460               | 0,0213           | 2,6544                                | 0,0238           | 2,9646            | 0,2158           |
| 40 | 45  | 4,3       | 4,4694               | 0,0287           | 4,5116                                | 0,0448           | 4,2454            | 0,0030           |
|    |     |           | SQR                  | 3,3010           | SQR                                   | 0,1128           | SQR               | 1,6043           |

Tabela 4.4 - Teste do Ajuste da Curva de Oommen

## 4.2. Conclusões

Dada a necessidade de se modelar as curvas de equilíbrio de umidade aqui relacionadas, nota-se que a ferramenta de programação genética se mostra eficaz na resolução de tal problema. Da análise das Tabelas 4.3 e 4.4, observa-se que para a Curva de Oommen, o ajuste por Programação Genética gera menores resíduos do que o ajuste polinomial. Assim, a forma de aplicação desta ferramenta no *software* especialista que foi desenvolvido usa da seguinte lógica: a) Caso o ponto a ser calculado esteja na região delimitada pelas Figuras 2.12 e 2.13 (Ábacos de equilíbrio de umidade), utiliza-se o ajuste por interpolação. b) Caso contrário, utiliza-se o ajuste por Programação Genética, para a Curva de Oommen, ou o ajuste polinomial, para a Curva de Fabre-Pichon.

# Capítulo 5 – Modelo Unidimensional para Migração de Água no Papel

Como forma de atender à demanda de um modelo que exemplifique a dinâmica de umidade no transformador, um modelo matemático foi desenvolvido. As principais características desse modelo devem ser a simplicidade (facilidade de entendimento e implementação), a eficácia (os resultados gerados pelo modelo devem atender às tendências de comportamento encontradas em campo) e o baixo custo computacional (após a implementação, é desejado que a simulação de tal modelo não consuma muitos recursos computacionais). A primeira proposta matemática a ser apresentada é a criação de um modelo matemático unidimensional, isto é, um modelo que discretize o papel em somente uma direção.

Este capítulo apresenta em detalhes o modelo matemático unidimensional desenvolvido, bem como aspectos de implementação do mesmo no *software* MUSPO. Primeiramente é necessário tecer considerações sobre a variável que modifica os valores de concentração de água no óleo e no papel: a temperatura.

#### 5.1. Influência da Temperatura no modelo matemático unidimensional

Baseado nas Figuras 2.12 e 2.13, observa-se que as variações nas concentrações de umidade no papel-óleo são regidas pelas variações de temperatura, uma vez que a massa de água no transformador pode ser considerada constante [5]. Dessa forma, a única variável que influencia a dinâmica da umidade é a temperatura.

Nos modelos a serem apresentados neste capítulo e no seguinte, foi possível desmembrar o interior do transformador em três elementos: óleo, celulose e os condutores dos enrolamentos. Desprezando variações na temperatura ambiente, o primeiro elemento, dentre os três anteriormente citados, a perceber a variação de temperatura são os condutores dos enrolamentos, visto que estes são os responsáveis pela condução da energia elétrica.

Como o papel é estacionário em relação aos condutores dos enrolamentos, isto é, não muda sua posição ao longo do tempo, envolvendo-os diretamente, a troca de calor entre o papel e os condutores dos enrolamentos se dá através da condução. Porém, como a espessura no papel é pequena (uma prática comum na confecção de bobinas de enrolamentos de transformadores é a superposição de três camadas de papel de 0,06 mm, totalizando 0,18 mm), pode-se considerar que a temperatura no papel é a mesma do que a dos condutores, mesmo porque todo o

fluxo de calor oriundo dos condutores passa através do papel. O mesmo raciocínio é válido para o óleo na vizinhança do papel.

A temperatura considerada no modelo é a temperatura do fundo do enrolamento, de forma a se agir conservadoramente. Tal raciocínio é explicado pela análise das curvas de equilíbrio. Considerando um mesmo valor de concentração de umidade em óleo, quanto menor a temperatura, maior será a concentração de água no papel. Como a temperatura do fundo do enrolamento é menor do que a do topo do enrolamento, onde se encontram os pontos mais quentes, essa variável será considerada.

# 5.2. Especificações do Modelo

As principais características a serem descritas do modelo unidimensional é a configuração da discretização do papel, o equacionamento a ser realizado para o cálculo das concentrações de água no papel e no óleo, e o fluxograma indicando a ordem dos cálculos a serem realizados. Esta seção possui como objetivo descrever tais características em maiores detalhes.

#### 5.2.1. Desenhos

O diagrama representativo do modelo unidimensional é apresentado na Figura 5.1. Nesta figura é possível observar que a discretização do papel só ocorre em uma dimensão, e se dá ao longo da espessura do papel (direção óleo-enrolamento). Considerando que o papel foi discretizado em M elementos, cada célula discretizada possui coordenada m, que varia de 1 a M.



Figura 5.1 – Diagrama representativo do modelo unidimensional.

O ponto de coordenada m = 1 é a célula que está mais a esquerda, conforme mostrado na Figura 5.1, e representa o pedaço de papel que está em contato com o óleo. Assim é definido nesse trabalho que o ponto m = 1 está na Interface Papel-Óleo (IPO). Usando um raciocínio semelhante, observa-se que o ponto cuja coordenada m = M está mais à direita no papel, e está

Fonte: próprio autor (2016)

em contato com o enrolamento. Tal ponto é definido como pertencente à Interface Papel-Enrolamento (IPE). Os demais pontos são nomeados como pontos internos ao papel. A diferenciação desses pontos específicos é útil no equacionamento do sistema: conforme será visto adiante, o ponto na IPO terá seu valor de concentração de umidade calculado pelas curvas de Fabre-Pichon e Oommen; os pontos internos terão suas concentrações calculadas conforme equação de difusão de massa, mostrada na subseção 5.2.3; e o ponto na IPE terá valor de concentração calculado conforme equação de difusão de massa, porém com uma condição de contorno diferente dos pontos internos.

#### 5.2.2. Fluxograma de cálculo para o modelo unidimensional

Como o modelo trabalha com três elementos (óleo, papel e condutores do enrolamento), e é necessário o cálculo de concentrações de umidade em dois deles (papel e óleo), é necessário estabelecer uma ordem para calcular tais variáveis. A subseção 5.2.3 apresenta em detalhes o equacionamento a ser usado nesses cálculos.

Um fluxograma que indica a ordem dos cálculos das variáveis citadas ao longo das iterações é exibido na Figura 5.2. Conforme apresentado nesse gráfico, com as informações da concentração de água no óleo e da temperatura, é possível calcular a concentração de umidade no papel.

No primeiro instante de tempo, o usuário informa o valor da concentração de água no óleo, em ppm. Os valores de temperatura, durante toda a simulação, são gerados pelo *software* CTransf [48], que é uma ferramenta computacional para estudo de carregamento de transformadores de potência. Com os valores da temperatura do ponto mais quente e da concentração de água no óleo, é calculado o valor da concentração de água no papel na IPO, através das Curvas de Fabre-Pichon e Oommen, descritas no Capítulo 4. Para a primeira iteração, as concentrações de água em todas as células do papel são consideradas iguais às da célula na IPO.

Para a segunda iteração, o valor da concentração de água no óleo é considerado o mesmo da primeira iteração. Como a temperatura do enrolamento poderá sofrer alterações, um novo valor de concentração de água no papel na IPO é calculado, via curvas de equilíbrio. Os nós internos terão seus valores de concentração calculados conforme equacionamento de difusão de massa (conforme será mostrado na subseção 5.2.3). Através da diferença da massa de água no papel entre a segunda e a primeira iterações é possível calcular a concentração de água no óleo, para a terceira iteração. As demais iterações seguem raciocínio semelhante à segunda iteração.



Figura 5.2 – Fluxograma de cálculo para o modelo unidimensional

Fonte: próprio autor (2016)
#### 5.2.3. Equacionamento no papel

O processo de difusão de água no papel pode ser modelado através da Lei de Fick [44], apresentada no Capítulo 2 e em (5.1).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 C = D \cdot \left(\frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{d^2 C}{dy^2} + \frac{d^2 C}{dz^2}\right)$$
(5.1)

No caso de uma dimensão, as variáveis y e z não existem, podendo-se simplificar a Equação (5.1), chegando-se à (5.2).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{d^2 c}{dx^2} \tag{5.2}$$

Discretizando-se o papel conforme mostrado na Figura 5.1, pode-se aplicar a equação para cada ponto de coordenada m. Fazendo isso, a Equação (5.2) toma a forma da Equação (5.3), sendo  $C_m^{i+1} e C_m^{i+1}$  as concentrações de água no papel para elemento de coordenada me nas iterações i e i + 1, respectivamente. As variáveis  $\Delta t e \Delta x^2$  são as discretizações do tempo e do espaço, respectivamente.

$$\frac{C_m^{i+1} - C_m^i}{\Delta t} = D \cdot \left(\frac{C_{m+1} - 2 \cdot C_m + C_{m-1}}{\Delta x^2}\right)$$
(5.3)

Para resolver a Equação (5.3), é necessário considerar-se que as concentrações no papel exibidas no lado direito desta equação estejam situadas em um instante de tempo, seja a iteração i ou a iteração i + 1. Dessa forma existem duas formas de se resolver a Equação (5.3).

A primeira forma é através do uso da Formulação Explícita [49]. Nessa formulação consideramos que as variáveis do lado direito da Equação (5.3) estão na iteração *i*. Dessa forma obtém-se a Equação (5.4).

$$\frac{C_m^{i+1} - C_m^{i}}{\Delta t} = D \cdot \left(\frac{C_{m+1}^{i} - 2 \cdot C_m^{i} + C_{m-1}^{i}}{\Delta x^2}\right)$$
(5.4)

A resolução da Equação (5.4) se dá de forma direta, bastando apenas isolar o termo  $C_m^{i+1}$ , que se deseja encontrar. Assim, chega-se em (5.5).

$$C_m^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x^2} \cdot \left( C_{m+1}^{i} - 2 \cdot C_m^{i} + C_{m-1}^{i} \right) + C_m^{i}$$
(5.5)

Assim, caso seja desejado usar a formulação explícita para se encontrar as concentrações de água no papel, é necessário apenas o uso da Equação (5.5) para cada célula de coordenada m do papel.

Outro método para se resolver (5.3) é considerar-se que as concentrações de água no papel estão todas localizadas na iteração i + 1. Tal método é denominado Formulação Implícita [42], e está representado pela Equação (5.6).

$$\frac{c_m^{i+1} - c_m^i}{\Delta t} = D \cdot \left(\frac{c_{m+1}^{i+1} - 2 \cdot c_m^{i+1} + c_{m-1}^{i+1}}{\Delta x^2}\right)$$
(5.6)

Para resolver a Equação (5.6), é necessário a resolução de um sistema linear. Rearranjando termos, obtém-se a (5.7).

$$C_{m+1}^{i+1} - \left(2 + \frac{\Delta x^2}{D \cdot \Delta t}\right) \cdot C_m^{i+1} + C_{m-1}^{i+1} = -\frac{\Delta x^2}{D \cdot \Delta t} \cdot C_m^{i}$$
(5.7)

Considerando a variável  $\alpha$  como uma simplificação de variáveis, conforme exibido em (5.8), obtém-se (5.9).

$$\alpha = \left(2 + \frac{\Delta x^2}{D \cdot \Delta t}\right) \tag{5.8}$$

$$C_{m+1}^{i+1} - \alpha \cdot C_m^{i+1} + C_{m-1}^{i+1} = (2 - \alpha) \cdot C_m^{i}$$
(5.9)

Conforme explicado em [41], o método implícito possui vantagem sobre o explícito por garantir estabilidade numérica, porém exige que todos os valores de concentração sejam calculados simultaneamente, através de métodos iterativos. Dessa forma essa técnica é utilizada nesse trabalho.

#### 5.2.4. Condições de Contorno

As células de papel cujas coordenadas pertencem ao intervalo [2, ..., m - 1] podem ter seus valores de concentração de umidade calculados conforme a Equação (5.9). Porém as células nas extremidades no papel, ou seja, na interface papel-óleo (m = 1) e na interface papelenrolamento (m = M) devem ter seus valores calculados de maneira diferente. A célula de papel na Interface Papel-Óleo deve ter seu valor de concentração de umidade calculado conforme as Curvas de Fabre-Pichon e Oommen, pois é considerada em regime estacionário, conforme sugerido por vários autores ([5], [12] e [21], por exemplo). Assim, durante o processo iterativo, após obter os valores de temperatura e concentração de água no óleo, usase tais curvas para encontrar a concentração de água no papel para m = 1.

O condutor do enrolamento, qualquer seja o material utilizado em sua fabricação (usualmente cobre ou alumínio), é considerado como uma superfície impermeável, ou seja, não há entrada e migração de água no interior do mesmo. Assim, o nó do papel de coordenada m = Mtem como vizinhos um nó de papel (coordenada m = M - 1) que absorve água, e o enrolamento, que não absorve umidade e é modelado como um "espelho" [43]. Assim, é possível fazer uma simplificação e considerar o nó na interface papel-enrolamento como um nó interno cujos vizinhos possuem coordenadas M - 1 [44]. Desta forma as Equações (5.4) e (5.6), quando aplicadas a esse nó extremo, se transformam nas Equações (5.10) e (5.11), relativas ás Formulações Explícita e Implícita, respectivamente.

$$C_{M}^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x^{2}} \cdot \left(2 \cdot C_{M-1}^{i} - 2 \cdot C_{M}^{i}\right) + C_{M}^{i}$$
(5.10)

$$2 \cdot C_{M-1}^{i+1} - \alpha \cdot C_M^{i+1} = (2 - \alpha) \cdot C_M^i$$
(5.11)

Em resumo, estabelecidas as condições de contorno, é possível calcular as concentrações de água no papel para cada iteração seguindo os seguintes procedimentos.

a) Considerando a Formulação Explícita, usar as Equações (5.12) a (5.14).

 $C_1^{i+1}$  = concentração de água no papel, na condição de equilíbrio, obtido através da aplicação das equações apresentadas no capítulo 4. (5.12)

$$C_m^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x^2} \cdot \left( C_{m+1}^{i} - 2 \cdot C_m^{i} + C_{m-1}^{i} \right) + C_m^{i}, \text{ para } m = 2, \dots, M - 1 \quad (5.13)$$

$$C_M^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x^2} \cdot \left(2 \cdot C_{M-1}^i - 2 \cdot C_M^i\right) + C_M^i \tag{5.14}$$

# b) Considerando a Formulação Implícita, resolver o Sistema Linear exibido na Equa-

ção (5.15), onde  $C_{CURVA}$  é a concentração de água no papel, na condição de equilíbrio, obtido através da aplicação das equações apresentadas no capítulo 4.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & & & \\ 1 & -\alpha & 1 & 0 & \cdots & & 0 & \\ 0 & 1 & -\alpha & 1 & & & \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ & & & 1 & -\alpha & 1 & 0 \\ 0 & & \cdots & 0 & 1 & -\alpha & 1 \\ & & & & 0 & 0 & 2 & -\alpha \end{bmatrix}_{M \times M} \cdot \begin{bmatrix} C_1^{i+1} \\ C_2^{i+1} \\ C_3^{i+1} \\ \vdots \\ C_{M-1}^{i+1} \\ C_M^{i+1} \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} C_{CURVA} \\ C_1^i \\ C_2^i \\ \vdots \\ C_{M-1}^i \\ C_M^i \end{bmatrix}_{M \times 1}$$
(5.15)

#### 5.2.5. Equacionamento do Óleo

A massa de água no interior de um transformador está contida no papel e no óleo isolante. Como a taxa de produção de água através de reações químicas pode ser considerada muito pequena [5], a massa total de água no transformador é considerada numericamente igual à soma das massas de água no óleo e no papel, conforme mostra a Equação (5.16), sendo  $m_{H_2O,t}^i$ ,  $m_{H_2O,6leo}^i$  e  $m_{H_2O,papel}^i$  variáveis que representam, respectivamente, as massas de água no transformador, no óleo e no papel para uma *i*-ésima iteração.

$$m_{H_20,t}^i = m_{H_20,\delta leo}^i + m_{H_20,papel}^i$$
(5.16)

A massa de água no óleo pode ser obtida pela Equação (5.17), e as variáveis  $m_{\delta leo}$  e  $C_{oleo}^{i}$  representam respectivamente a massa de óleo no transformador e a concentração de água no óleo para um determinado instante, em ppm (partes por milhão).

$$m_{H_20,oleo}^i = m_{\delta leo} \cdot C_{oleo}^i \cdot 10^{-6}$$
(5.17)

Por sua vez, a massa de água no papel pode ser calculada pela Equação (5.18), onde  $m_{papel}$  é a variável que representa a massa de papel no transformador, em quilogramas.

$$m_{H_20,papel}^i = \sum_{m=1}^{M} \frac{m_{papel}}{M} \cdot C_m^i \cdot 10^{-2}$$
(5.18)

Combinando as Equações (5.16) a (5.18) obtém-se (5.19).

$$m_{H_20,t} = m_{\delta leo} \cdot C^i_{oleo} \cdot 10^{-6} + \sum_{m=1}^{M} \frac{m_{papel}}{M} \cdot C^i_m \cdot 10^{-2}$$
(5.19)

Isolando a variável  $C^i_{\delta leo}$ , obtém-se a Equação (5.20), que permite obter a concentração de água no óleo para qualquer iteração desejada.

$$C_{\delta leo}^{i} = \frac{m_{H_{2}O,t} - \sum_{m=1}^{M} \frac{m_{papel}}{M} \cdot C_{m}^{i} \cdot 10^{-2}}{m_{\delta leo} \cdot 10^{-6}}$$
(5.20)

# 5.3. Implementação no software MUSPO

O modelo matemático anteriormente descrito foi implementado para verificação no *software* MUSPO, desenvolvido em linguagem Matlab [47].

De forma a permitir ao usuário simular tais modelos, uma janela de interface gráfica foi desenvolvida, e uma captura de tela desta janela é exibida na Figura 5.3. Nesta figura, observase todas as variáveis de entrada que o usuário deve inserir para simular vários casos.

O resultado de uma simulação utilizando dados empíricos de amostras de óleo isolante de transformadores de potência é exibida na Figura 5.4. Nesta, nota-se uma representação gráfica das variáveis descritas anteriormente nesse capítulo, e as grandezas exibidas são: temperatura do enrolamento, concentração de água no papel *versus* espessura, concentração de água no papel nas interfaces papel-óleo e papel-enrolamento, concentração de água e saturação relativa do óleo, e massas de água no papel e no óleo.

No Capítulo 7 é discutido em detalhes a validação do modelo unidimensional. O comportamento das curvas exibidas na Figura 5.4 é analisado frente a diversos cenários, e é confrontado com valores obtidos em campo, considerados como valores de referência.

| Carregar Dados                         | a second of a second seco |             |  |  |
|--|--|-------------|--|--|
| — Dados de Simulação—————              |  |             |  |  |
| Analista:                              |  |             |  |  |
| Equipamento:                           |  |             |  |  |
| Escolha a Opção de Carregamento        |  |             |  |  |
| Inserir Planilha do CTransf            | Carregar dados   |             |  |  |
|  | Insira o número da aba desejada da planilha 1 Ok   |             |  |  |
|  | Simulação:   |             |  |  |
| Inserir Planilha Genèrica              | OPÇÃO SELECIONADA: Inserir Planilha Genérica   |             |  |  |
|  | Carregar dados   |             |  |  |
| Dados do Transformador                 | Dados de Simulação   |             |  |  |
| Massa de óleo [kg]:                    | 2.9732 Número de divisões de discretização em x (M):   | 30          |  |  |
| Massa de papel [kg]:                   | 0.00551   Modelo 1D Número divisões altura (N)   | 10          |  |  |
| Espessura de uma camada de papel [mm]: | 1 O Modelo 2D Quantidade de dias a serem simulados   | 1           |  |  |
| Quantidade de camadas de papel         |  |             |  |  |
| Altura do Enrolamento [m]              | 1.5 Intervalo de tempo para simulação [min]:   | 15          |  |  |
| — Dados da Amostra                     |  |             |  |  |
| Válvula superior                       | Válvula inferior Data e Hora da amostra  |             |  |  |
| Quantidade de água no óleo [ppm]:      | 51.7 Quantidade de água no óleo (ppm): 51.7  | 19 May 2015 |  |  |
| Temperatura da amostra de óleo [°C]    | 60         Temperatura da amostra de óleo [°C]         60         Inserir Hora [HH:M   | M] 00:00    |  |  |
| Status da Simulação                    |  |             |  |  |
| Status:                                | -<br>Aguardando Dados de Entrada - Favor selecionar uma Opção de Carregamento  |             |  |  |
| Calcular                               |  |             |  |  |

| Figura 3.3 – Janeia de Inserção de Variaveis |
|--|
|--|

Fonte: próprio autor (2016)



Figura 5.4 – Janela de resultados para o modelo unidimensional

# 5.4. Conclusões

Do que foi apresentado para o modelo unidimensional, é constatado baixo custo de recursos computacionais, aliado a uma certa precisão do modelo. Conforme é mostrado adiante, apesar da simplicidade, quando comparado ao modelo bidimensional, o método em uma dimensão é eficaz e rápido, em especial para análises mais superficiais.

O capítulo 6 apresenta o modelo bidimensional, que possui definições parecidas com o apresentado nessa seção.

# Capítulo 6 – Modelo Bidimensional para Migração de Água no Papel

# 6.1. Considerações

Este capítulo apresenta o modelo bidimensional desenvolvido para a migração de água no sistema isolante do transformador, desenvolvido nesse trabalho. Também exibe o objetivo e a justificativa deste modelo, bem como mostra comparações entre o modelo bidimensional e o unidimensional. Além disso, apresenta o equacionamento do modelo e a implementação dessa modelagem matemática no *software* MUSPO.

A proposta de criar um modelo bidimensional é analisar como a água irá migrar ao longo da espessura do papel e da altura do enrolamento, no papel e no óleo. Tal análise é importante pois a temperatura no enrolamento de um transformador varia significativamente ao longo da vertical, conforme exibido no Capítulo 2. Logo, há a possibilidade de uma ampla variação da concentração de água no óleo e no papel, ao longo de seu perfil. Dessa forma, o objetivo do modelo bidimensional é simular a migração de água no papel e no óleo ao longo dos dois eixos (espessura do papel e altura do enrolamento). A justificativa de tal modelo é o fato da visualização do perfil da umidade ao longo dos eixos supracitados permitir uma análise mais minuciosa, possibilitando mais dados técnicos para uma tomada de decisão por parte da engenharia.

# 6.2. Influência da temperatura no modelo matemático bidimensional

Conforme apresentado no Capítulo 2, o modelo matemático bidimensional considera que a temperatura do enrolamento segue o perfil apresentado por Nadabi [18], mostrado na Figura 2.8. Dessa forma, a temperatura do enrolamento e do papel são descritas pela mesma função linear, e a temperatura do óleo possui a mesma inclinação da temperatura do enrolamento, porém com valor reduzido através de uma constante g.

### 6.3. Especificações do modelo

A seguir são descritas, em detalhes, as características do modelo bidimensional de difusão de água no papel de transformadores de força.

#### 6.3.1. Desenhos

O modelo bidimensional proposto é ilustrado na Figura 6.1. Nela observam-se os três

elementos internos ao transformador de potência considerados: óleo, papel e condutor do enrolamento. Comparando a Figura 6.1 com a Figura 2.1 nota-se a discretização, em células, desses elementos ao longo dos eixos da espessura e da altura do transformador. Assim, mapeando essas células e representando tal mapa como uma matriz de coordenadas, o enrolamento possui pontos com coordenadas (1;n), para n variando de 1 até N, onde N é o número de divisões da altura. O óleo, da mesma forma que o enrolamento, possui pontos de coordenadas (1;n), para n variando de 1 até N. Por sua vez o papel é discretizado em duas dimensões, e portanto possui pontos com coordenadas (m;n), com m variando de 1 até M e n variando de 1 até N. Na mesma figura, são destacadas as válvulas para amostragem de óleo, que são os pontos de coleta que vão permitir obter dados de temperatura e umidade da amostra de óleo.



Figura 6.1 – Diagrama representativo do modelo bidimensional

Fonte: próprio autor (2016)

Comparando a Figura 6.1 com a Figura 5.1, o modelo unidimensional e a distribuição de temperaturas no enrolamento do transformador, faz-se a seguinte constatação: o modelo unidi-

mensional, aplicado a diversas lâminas ao longo da altura, é uma aproximação do modelo bidimensional. A vantagem do modelo em uma dimensão é o reduzido esforço computacional, quando comparado ao modelo em duas dimensões. Apesar disso, espera-se que as informações retornadas pelo modelo bidimensional sejam mais ricas do que as informadas pelo modelo unidimensional, o que não faz um método de simulação ser melhor do que o outro.

### 6.3.2. Fluxograma do processo

O fluxograma do cálculo das concentrações de água no papel e no óleo é apresentado na Figura 6.2. Nota-se que primeiramente é calculado a concentração de água no papel, e posteriormente a concentração de água no óleo.

Observa-se também que o cálculo do perfil da temperatura do enrolamento é realizado antes do cálculo da concentração de água no papel, pois é necessário considerar a variação de temperatura no enrolamento conforme a altura.

#### 6.3.3. Condições de Contorno

Da mesma forma que no modelo unidimensional, é necessário o estabelecimento de condições de contorno espaciais e temporais para o modelo bidimensional.

Na primeira iteração, é considerado que a concentração de água no óleo varie linearmente, conforme valores obtidos nas amostras das válvulas inferior e superior de amostragem de óleo. Nas iterações seguintes, tal perfil linear poderá ser alterado conforme varie a distribuição de concentração de água no papel e a temperatura do enrolamento. Tal situação dos perfis de concentrações para a primeira iteração é ilustrada na Figura 6.3.



Figura 6.2 - Fluxograma de cálculo para o modelo bidimensional

Fonte: próprio autor (2016)



Figura 6.3 - Condições de contorno temporais para o modelo bidimensional (primeira itera-

Fonte: próprio autor (2016)

Quanto aos nós do papel, pode-se dividi-los em três categorias: nós na interface papelenrolamento, nós na interface papel-óleo e nós internos. Nós internos são aqueles cuja vizinhança são outros nós de papel, e devem ter seus valores de concentração de umidade calculados conforme mostrado na seção seguinte. Os nós que estão na fronteira com o enrolamento são considerados como nós espelhados, e devem ter seus valores de concentração calculados de forma diferente dos nós internos. Já os nós que fazem parte da interface papel-óleo possuem concentrações de umidade calculadas conforme as Curvas de Fabre-Pichon e Oommen, e podem ser localizados como nós esquerdos, nós superiores e nós inferiores, conforme mostrado na Figura 6.4. Tal figura tem como exemplo o papel dividido em três partes, tanto ao longo da espessura como ao longo da altura.

Estabelecidas as formas de discretização do papel, bem como as condições de contorno, é possível fazer o equacionamento de cada nó.



Figura 6.4 - Tipos de nós do papel, quanto à vizinhança

Fonte: próprio autor (2016)

## 6.3.4. Equacionamento no papel

Da mesma forma que no modelo bidimensional, a Lei de Fick [43] modela a difusão de água no papel, e é apresentada em (6.1) para o caso de duas dimensões.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 C = D \cdot \left(\frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{d^2 C}{dy^2}\right) \tag{6.1}$$

Discretizando a Equação (6.1) nas variáveis espaciais e temporal, obtém-se (6.2), onde  $C_{m,n}^i$  representa a concentração de água no papel para um ponto de coordenada (*m*;*n*).

$$\frac{C_{m,n}^{i+1} - C_{m,n}^{i}}{\Delta t} = D \cdot \left( \frac{C_{m+1,n} - 2 \cdot C_{m,n} + C_{m-1,n}}{\Delta x^2} + \frac{C_{m,n+1} - 2 \cdot C_{m,n} + C_{m,n-1}}{\Delta y^2} \right)$$
(6.2)

Diferentemente do modelo unidimensional, não existe um método direto para se resolver (6.2), seja por substituição direta ou através de um sistema linear. Para contornar tal problema,

foi utilizado o método implícito das direções alternadas (no inglês *alternate-direction implicit*, ou ADI) conforme mostrado por Cunha [50] e Chapra [42]. Em resumo, o método ADI divide a equação original, que é resolvida para um intervalo de tempo  $\Delta t$ , em duas equações de diferenças finitas, que são usadas consecutivamente em intervalos de tempo  $\frac{\Delta t}{2}$ . A primeira equação é explícita em x e implícita em y. Por sua vez, a segunda equação é implícita em x e explícita em y. Uma representação gráfica do método ADI é apresentada na Figura 6.5. Nela, observam-se duas etapas, referentes às equações explícitas e implícitas.





Fonte: adaptado de [42].

Para a Equação (6.2), na primeira etapa a variável temporal vai de *i* até  $i + \frac{1}{2}$ . Nesse caso, a equação a ser usada é a Equação (6.3).

$$\frac{c_{m,n}^{i+1/2} - c_{m,n}^{i}}{\Delta t/2} = D \cdot \left( \frac{c_{m+1,n}^{i} - 2 \cdot c_{m,n}^{i} + c_{m-1,n}^{i}}{\Delta x^{2}} + \frac{c_{m,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot c_{m,n}^{i+1/2} + c_{m,n-1}^{i+1/2}}{\Delta y^{2}} \right)$$
(6.3)

Na segunda etapa do método ADI, a variável tempo "t" vai de  $i + \frac{1}{2}$  até i + 1. Assim obtém-se a Equação (6.4).

$$\frac{c_{m,n}^{i+1} - c_{m,n}^{i+1/2}}{\Delta t/2} = D \cdot \left( \frac{c_{m+1,n}^{i+1} - 2 \cdot c_{m,n}^{i+1} + c_{m-1,n}^{i+1}}{\Delta x^2} + \frac{c_{m,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot c_{m,n}^{i+1/2} + c_{m,n-1}^{i+1/2}}{\Delta y^2} \right)$$
(6.4)

Para se simplificar (6.3) e (6.4), as variáveis  $\lambda$ ,  $\gamma \in \eta$  são obtidas conforme mostrado em (6.5) a (6.7). Assim, as Equações (6.3) e (6.4) são reescritas conforme mostrado em (6.8) e (6.9).

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t/2} \tag{6.5}$$

$$\gamma = \frac{D}{\Delta y^2} \tag{6.6}$$

$$\eta = \frac{D}{\Delta x^2} \tag{6.7}$$

$$(\lambda + 2 \cdot \gamma) \cdot C_{m,n}^{i+1/2} - \gamma \cdot C_{m,n+1}^{i+1/2} - \gamma \cdot C_{m,n-1}^{i+1/2} = \lambda \cdot C_{m,n}^{i} + \eta \cdot \left(C_{m+1,n}^{i} - 2 \cdot C_{m,n}^{i} + C_{m-1,n}^{i}\right)$$
(6.8)

$$(\lambda + 2 \cdot \eta) \cdot C_{m,n}^{i+1} - \eta \cdot C_{m+1,n}^{i+1} - \eta \cdot C_{m,n-1}^{i+1} = \lambda \cdot C_{m,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left(C_{m,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{m,n}^{i+1/2} + C_{m,n-1}^{i+1/2}\right)$$
(6.9)

Quanto os nós na interface papel-enrolamento, deve-se considerá-los como nós de espelho, da mesma forma que foi apresentado no Capítulo 5 para o modelo unidimensional. Dessa forma, para esses nós, a primeira e segunda etapas do método ADI são expressas nas Equações (6.10) e (6.11), respectivamente.

$$(\lambda + 2 \cdot \gamma) \cdot C_{M,n}^{i+1/2} - \gamma \cdot C_{M,n+1}^{i+1/2} - \gamma \cdot C_{M,n-1}^{i+1/2} = \lambda \cdot C_{M,n}^{i} + \eta \cdot \left(2 \cdot C_{M-1,n}^{i} - 2 \cdot C_{M,n}^{i}\right)$$
(6.10)

$$(\lambda + 2 \cdot \eta) \cdot C_{M,n}^{i+1} - \eta \cdot C_{M+1,n}^{i+1} - \eta \cdot C_{M,n-1}^{i+1} = \lambda \cdot C_{M,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left(2 \cdot C_{M,n-1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{M,n}^{i+1/2}\right)$$
(6.11)

Os elementos de papel na interface papel-óleo devem ter seus valores de concentração de

água calculados com o uso das Curvas de Fabre-Pichon e Oommen.

Em resumo, para se calcular a concentração de água no papel em seus diversos elementos discretizados, deve-se obedecer ao procedimento a seguir:

- a) Na primeira etapa, em que a variável tempo "t" vai de *i* até  $i + \frac{1}{2}$ , devem ser calculados os seguintes sistemas lineares, onde *I* representa a matriz identidade:
  - Para *m* igual a 1 (interface papel-óleo), usar a Equação (6.12), onde C<sub>CURVA</sub>, *n* é a concentração de água no papel para uma determinada altura *n*, na condição de equilíbrio, obtido através da aplicação das equações apresentadas no capítulo 4.

$$I \cdot \begin{bmatrix} C_{m,1}^{i+1/2} \\ C_{m,2}^{i+1/2} \\ C_{m,3}^{i+1/2} \\ \vdots \\ C_{m,N-2}^{i+1/2} \\ C_{m,N-2}^{i+1/2} \\ C_{m,N-1}^{i+1/2} \\ C_{m,N}^{i+1/2} \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} C_{CURVA,1} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,3} \\ \vdots \\ C_{CURVA,N-2} \\ C_{CURVA,N-1} \\ C_{CURVA,N} \end{bmatrix}_{N \times 1}$$
(6.12)

• Para *m* variando entre 2 até *M*-1, usar a Equação (6.13).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & & & \\ -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & 0 & \cdots & 0 & \\ 0 & -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & & \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ & 0 & \cdots & 0 & -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & 0 \\ & 0 & \cdots & 0 & -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \cdot \begin{bmatrix} C_{m,1}^{i+1/2} \\ C_{m,3}^{i+1/2} \\ \vdots \\ C_{m,N-2}^{i+1/2} \\ C_{m,N-1}^{i+1/2} \\ C_{m,N-1}^{i+1/2$$

• Para *m* igual a *M* (interface papel-enrolamento), usar a Equação (6.14).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & & & \\ -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & 0 & \cdots & 0 & & \\ 0 & -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & & & \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & & \\ 0 & & & 0 & -\gamma & \lambda + 2\alpha & -\gamma & 0 \\ & 0 & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \cdot \begin{bmatrix} C_{M,1}^{i+1/2} \\ C_{M,2}^{i+1/2} \\ \vdots \\ C_{M,N-2}^{i+1/2} \\ \vdots \\ C_{M,N-1}^{i+1/2} \\ C_{M,N-1}^{i+1/2} \\ C_{M,N-1}^{i+1/2} \\ C_{M,N-1}^{i+1/2} \end{bmatrix}_{N \times 1}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda \cdot C_{M,2}^{i} + \eta \cdot (2 \cdot C_{M-1,2}^{i} - 2 \cdot C_{M,2}^{i}) \\ \lambda \cdot C_{M,3}^{i} + \eta \cdot (2 \cdot C_{M-1,2}^{i} - 2 \cdot C_{M,2}^{i}) \\ \vdots \\ \lambda \cdot C_{M,N-2}^{i} + \eta \cdot (2 \cdot C_{M-1,N-2}^{i} - 2 \cdot C_{M,N-2}^{i}) \\ \lambda \cdot C_{M,N-1}^{i} + \eta \cdot (2 \cdot C_{M-1,N-1}^{i} - 2 \cdot C_{M,N-1}^{i}) \\ C_{CURVA,N} \end{pmatrix}_{N \times 1}$$
(6.14)

- b) Na segunda etapa, em que a variável tempo "t" vai de  $i + \frac{1}{2}$  até i + 1, devem ser calculados os seguintes sistemas lineares
  - Para n igual a 1, usar a Equação (6.15), onde C<sub>CURVA,m</sub> indica a concentração de água no papel para uma determinada espessura m, na condição de equilíbrio, obtido através da aplicação das equações apresentadas no capítulo 4.

$$I \cdot \begin{bmatrix} C_{1,n}^{i+1} \\ C_{2,n}^{i+1} \\ C_{3,n}^{i+1} \\ \vdots \\ C_{M-2,n}^{i+1} \\ C_{M-1,n}^{i+1} \\ C_{M,n}^{i+1} \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} C_{CURVA,1} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,3} \\ \vdots \\ C_{CURVA,M-2} \\ C_{CURVA,M-1} \\ C_{CURVA,M} \end{bmatrix}_{M \times 1}$$
(6.15)

• Para *n* variando entre 2 até *N*-1, usar a Equação (6.16).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\eta & \lambda + 2\eta & -\eta & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -\eta & \lambda + 2\eta & -\eta & \vdots & \vdots & \\ & 0 & \cdots & 0 & -\eta & \lambda + 2\eta & -\eta & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -\eta & \lambda + 2\eta & -\eta & 0 \\ & 0 & 0 & -2\eta & \lambda + 2\eta \end{bmatrix}_{M \times M} \cdot \begin{bmatrix} C_{1,1}^{i+1} \\ C_{2,n}^{i+1} \\ C_{3,n}^{i+1} \\ \vdots \\ C_{M-1,n}^{i+1} \\ C_{M,n}^{i+1} \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} C_{CURVA,1} \\ \lambda \cdot C_{2,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left( C_{2,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{2,n}^{i+1/2} + C_{2,n-1}^{i+1/2} \right) \\ \lambda \cdot C_{3,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left( C_{3,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{3,n}^{i+1/2} + C_{3,n-1}^{i+1/2} \right) \\ \vdots \\ \lambda \cdot C_{M-2,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left( C_{M-2,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{M-2,n}^{i+1/2} + C_{M-2,n-1}^{i+1/2} \right) \\ \lambda \cdot C_{M-1,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left( C_{M-1,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{M-1,n}^{i+1/2} + C_{M-1,n-1}^{i+1/2} \right) \\ \lambda \cdot C_{M,n}^{i+1/2} + \gamma \cdot \left( 2 \cdot C_{M-1,n+1}^{i+1/2} - 2 \cdot C_{M,n}^{i+1/2} \right) \end{bmatrix}_{M \times 1}$$

$$(6.16)$$

• Para *n* igual a *N*, usar a Equação (6.17).

-i 1 -

$$I \cdot \begin{bmatrix} C_{1,n}^{i+1} \\ C_{2,n}^{i+1} \\ C_{3,n}^{i+1} \\ \vdots \\ C_{M-2,n}^{i+1} \\ C_{M-1,n}^{i+1} \\ C_{M,n}^{i+1} \end{bmatrix}_{M \times 1} = \begin{bmatrix} C_{CURVA,1} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,2} \\ C_{CURVA,3} \\ \vdots \\ C_{CURVA,M-1} \\ C_{CURVA,M-1} \\ C_{CURVA,M} \end{bmatrix}_{M \times 1}$$
(6.17)

6.3.5. Conservação da massa de água no transformador e equacionamento no óleo

De maneira análoga ao que foi considerado no modelo unidimensional, conforme mostrado no Capítulo 5, a massa de água no transformador em uma determinada iteração pode ser considerada constante e igual a soma das massas de água no papel e no óleo. Para uma iteração i é considerado que a massa de água no transformador a uma altura n é mantida constante, conforme mostrado pela Equação (6.18). Esta equação é similar à apresentada no modelo unidimensional.

$$m_{H_2O,t}^{i,n} = m_{H_2O,oleo}^{i,n} + m_{H_2O,papel}^{i,n}$$
(6.18)

A massa de água no óleo e a massa de água no papel podem ser obtidas pela Equações (6.19) e (6.20).

$$m_{H_20,oleo}^{i,n} = \frac{m_{\acute{o}leo}}{N} \cdot C_{\acute{o}leo}^{i,n} \cdot 10^{-6}$$
(6.19)

$$m_{H_20,papel}^{i,n} = \sum_{m=1}^{M} \frac{m_{papel}}{M \cdot N} \cdot C_{m,n}^i \cdot 10^{-2}$$
(6.20)

Combinando (6.18) a (6.20) e isolando o termo  $C_{\acute{o}leo}^{i,n}$  obtém-se a Equação (6.21), que permite calcular a concentração de água no óleo ao longo da altura, em uma determinada iteração.

$$C_{\delta leo}^{i,n} = \frac{m_{H_2O,t} - \sum_{m=1}^{M} \frac{m_{papel}}{M \cdot N} c_{m,n}^{i} \cdot 10^{-2}}{\frac{m_{\delta leo}}{N} \cdot 10^{-6}}$$
(6.21)

#### 6.4. Implementação no *software* MUSPO

O modelo matemático bidimensional foi implementado em *software* Matlab, para estudos. De forma a analisar o comportamento do equacionamento descrito neste capítulo, uma janela que exibe os gráficos foi criada, conforme mostrado na Figura 6.6. Nessa janela são exibidas as variáveis do modelo bidimensional, na forma de gráficos.

Como o modelo bidimensional conta com 4 variáveis (distância ao longo da espessura, distância ao longo da altura, tempo e concentração de umidade) não é possível representá-las todas de uma vez só. A solução encontrada para contornar esse problema é manter uma variável fixa (a saber, distância ao longo da altura ou tempo) e exibir as outras três. Frente a esse cenário, nota-se na Figura 6.6 dois painéis, intitulados "Análise para diferentes alturas" e "Análise para diferentes iterações", que permitem essa análise.



Figura 6.6 - Janela de resultados para o modelo bidimensional

Fonte: próprio autor (2016)

## 6.5. Conclusões

Observando o exposto neste capítulo, nota-se em primeiro momento o ineditismo do modelo bidimensional, até então não publicado na literatura. Além disso, constata-se também o poder em fornecer informações ricas para a análise de diversos equipamentos, e posteriores tomadas de decisão. Juntamente com o aumento de informações, é esperado uma elevação no gasto computacional, quando se compara o trabalho apresentado nesse capítulo com o anterior.

Dessa forma, é necessário a validação dos modelos apresentados. As próximas páginas apresentam tal etapa e comprovam a eficiência da ferramenta aqui descrita.

# Capítulo 7 – Validação dos modelos matemáticos desenvolvidos, através de simulações e estudos de caso

O objetivo desse capítulo é apresentar estudos que foram feitos usando o *software* MUSPO, a fim de verificar a precisão dos modelos matemáticos aqui apresentados. Para isso, são apresentados os seguintes estudos: a) simulação, que consiste na análise dos dados gerados pelo MUSPO; e b) os estudos de caso, que utilizam dados obtidos em campo para comparar com os resultados gerados através do modelo matemático desenvolvido.

Primeiramente é apresentada uma comparação entre trabalhos encontrados na literatura com os valores gerados pelo *software* desenvolvido.

## 7.1. Simulação 01 - Comparação com o trabalho de Zhou

Zhou *et.al.* [11] apresenta um modelo unidimensional cujo equacionamento para a concentração de umidade no papel é apresentado na Equação (7.1), e é diferente do proposto nessa dissertação, mostrado na Equação (4.5).

$$C_{m}^{i+1} = \frac{\Delta t \cdot D}{\Delta x^{2}} \cdot \left(\frac{C_{m+1}^{i} - C_{m}^{i}}{4} + C_{m+1}^{i} - 2 \cdot C_{m}^{i} + C_{m-1}^{i}\right) + C_{m}^{i}$$
(7.1)

Além disso, Zhou *et.al.* exibe uma validação experimental, em que uma camada de papel com espessura 1 mm é colocada imersa em uma amostra de óleo. Os dados do experimento são reproduzidos na Tabela 7.1 [11].

| Valor    |
|----------|
| 1 mm     |
| 51,7 ppm |
| 60 °C    |
| 5,51 g   |
| 2973,2 g |
| -        |

Tabela 7.1 - Dados experimentais do Experimento de Zhou.

Fonte: adaptado de [11].

É apresentada nas Figuras 7.1 a 7.3 a variação das seguintes variáveis usadas no experimento: temperatura, concentração de água no óleo e concentração de água no papel.



Figura 7.1 - Variação da temperatura com o tempo no experimento de Zhou

Figura 7.2 - Variação da concentração de água no óleo com o tempo no experimento de Zhou



Fonte: adaptado de [11].



Figura 7.3 – Variação da concentração de água no papel (valor médio) com o tempo no expe-

Fonte: adaptado de [11].

Como os dados são apresentados em forma de gráficos, e não de tabelas, não é possível obter os valores do ensaio. Usando o *software* Inkscape, pontos foram colhidos para reproduzir as curvas apresentadas por Zhou e permitir uma comparação dos trabalhos. Após isso, uma simulação foi feita no MUSPO usando tais pontos colhidos. Os parâmetros usados nessa simulação são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2. Parâmetros usados na simulação.

| Grandeza                             | Valor    |
|--------------------------------------|----------|
| Espessura da camada de papel         | 1 mm     |
| Concentração inicial de água no óleo | 51,7 ppm |
| Temperatura inicial do óleo          | 60 °C    |
| Massa de papel                       | 5,51 g   |
| Massa de óleo                        | 2973,2 g |
| Intervalo de discretização de tempo  | 1 min    |
| Número de discretizações do papel    | 100      |

É apresentada na Figura 7.4 a curva da temperatura usada na simulação no MUSPO. As

informações exibidas nas Figuras 7.5 e 7.6 são as variações das concentrações de água no óleo e no papel, usando as Curvas de Fabre-Pichon e Oommen.



Figura 7.4 – Temperatura usada na comparação com Zhou

Fonte: próprio autor (2016).





Fonte: próprio autor (2016).



Figura 7.6 – Concentração de água no papel – valor médio

Fonte: próprio autor (2016).

Uma comparação entre pontos do trabalho de Zhou e as duas simulações, exibidas nas Figuras 7.4 a 7.6, é apresentada na Tabela 7.3.

| Grandeza        | I     | Тетро         | Valor - Zhou | Simulação -  | Simulação — |
|-----------------|-------|---------------|--------------|--------------|-------------|
|                 |       |               |              | Fabre-Pichon | Oommen      |
| Concentração de | 03:00 | Valor         | 66,98        | 61,05        | 56,87       |
| água no óleo    |       | Diferença (%) | -            | -8,85 %      | -15,09 %    |
| (ppm)           | 06:00 | Valor         | 43,29        | 51,91        | 45,52       |
|                 |       | Diferença (%) | -            | 19,91 %      | 5,15 %      |
|                 | 09:00 | Valor         | 59,21        | 58,95        | 55,49       |
|                 |       | Diferença (%) | -            | -0,44 %      | -6,28 %     |
|                 | 12:00 | Valor         | 47,2         | 53,52        | 49,1        |
|                 |       | Diferença (%) | -            | 13,39 %      | 4,03 %      |
| Concentração de | 03:00 | Valor         | 1,97         | 2,159        | 3,036       |
| água no papel – |       | Diferença (%) | -            | 9,59 %       | 54,11 %     |
| valor médio (%) | 06:00 | Valor         | 3,24         | 2,642        | 3,641       |
|                 |       | Diferença (%) | -            | -18,46 %     | 12,38 %     |
|                 | 09:00 | Valor         | 2,38         | 2,269        | 3,11        |
|                 |       | Diferença (%) | -            | -4,66 %      | 30,67 %     |
|                 | 12:00 | Valor         | 3,04         | 2,548        | 3,439       |
|                 |       | Diferença (%) | -            | -16,18%      | 13,13 %     |

Tabela 7.3. Comparação numérica com Zhou

Analisando as Figuras 7.4 a 7.6 e a Tabela 7.3, observa-se que o modelo unidimensional proposto nesse trabalho possui comportamento similar ao apresentado por Zhou. As diferenças nos valores obtidos são atribuídas a dois fatores:

- O *software* MUSPO utiliza duas curvas de equilíbrio de umidade no sistema papel-óleo, as Curvas de Fabre-Pichon e as de Oommen. Zhou, por sua vez, utiliza as Curvas apresentadas por Du [21], que não são objeto de estudo dessa dissertação. Analisando tais curvas, nota-se que estas possuem comportamentos diferentes entre si. Dessa forma, uma simulação comparando o resultado de diferentes curvas de umidade, considerando o transformador sujeito ao mesmo carregamento, não retornará valores iguais entre si. Tal afirmação pode ser confirmada comparando somente a resposta da umidade no papel (ou no óleo) através do uso das Curvas de Fabre-Pichon e de Oommen (exibido nas Figuras 7.5 e 7.6), que possuem valores diferentes entre si;
- Como Zhou não apresenta os dados de seu experimento, erros de paralaxe são obtidos, podendo influenciar nos resultados obtidos.

## 7.2. Análises realizadas com transformadores de potência – estudos de caso

A seguir são analisados estudos de casos onde os equipamentos sobre estudo pertencem à empresa CELG Distribuição S.A. Três transformadores em operação foram selecionados, e suas características são apresentadas na Tabela 7.4. Vale ressaltar que tais transformadores estão alimentando cargas da região metropolitana de Goiânia, o que reforça a importância da predição da dinâmica de umidade nestes equipamentos.

Analisando a Tabela 7.4, convém traçar relações entre as variáveis apresentadas. Tais relações são apresentadas na Figura 7.7. A figura (a) apresenta uma relação entre a massa de papel *kraft* (estrutura fina "quente") e a massa de papelão (estrutura fina "fria"). A figura (b) ilustra a divisão entre a massa do sistema isolante (celulose mais óleo) e a massa da parte ativa, para os três transformadores. Por sua vez, a figura (c) apresenta a razão entre a massa total de celulose e a massa total de óleo. Finalmente, a figura (d) ilustra em termos percentuais como se dá a distribuição de óleo ao longo dos transformadores. Nessa última figura vale acrescentar que o manual dos transformadores 2 e 3 não apresenta o volume de óleo existente no tanque de expansão, tanque do CDC, relé Buccholz (relé de gás) e tubulações, logo o valor apresentado nesta região é nulo. Apesar disso, é possível estimar que entre 8% e 10% do óleo total estão

compreendidos nessa localidade.

| Equipamento              | Transformador 1          | Transformador 2          | Transformador 3              |  |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|--|
|                          | (Tr 1)                   | (Tr 2)                   | (Tr 3)                       |  |
| Relação de tensões       | 138 kV / 13,8 kV         | 138 kV / 13,8 kV         | 138 kV / 13,8 kV             |  |
| Potência                 | 20/26,6/33,3 MVA         | 20/26,6/33,3 MVA         | 20/26,6/33,3 MVA             |  |
| Sistema de refrigeração  | ONAN/ONAF/ONAF           | ONAN/ONAF/ONAF           | ONAN/ONAF/ONAF               |  |
| Ligação                  | Yy                       | Yy                       | Үу                           |  |
| Ano de fabricação        | 1993                     | 1998                     | 1998                         |  |
| Início da operação       | 27/fev/1994              | 24/jan/1999              | 18/mar/2001                  |  |
| Sistema de conservação   | Tanque de expansão       | Tanque de expansão       | Tanque de expansão com       |  |
| do óleo                  | com bolsa e respirador a | com bolsa e respirador a | bolsa e respirador a sílica- |  |
|                          | sílica-gel               | sílica-gel               | gel                          |  |
| Sistema de comutação     | CDST                     | CSC interno              | CSC interno                  |  |
| Altura dos Enrolamentos  | 1,28 m                   | 1,7 m                    | 1,7 m                        |  |
| Espessura das camadas    | 3 x 0,06 mm              | 3 x 0,06 mm              | 3 x 0,06 mm                  |  |
| de papel de cada condu-  |                          |                          |                              |  |
| tor                      |                          |                          |                              |  |
| Material do condutor dos | Cobre                    | Cobre                    | Cobre                        |  |
| enrolamentos             |                          |                          |                              |  |
| Peso Total               | 58850 kg                 | 58500 kg                 | 58500 kg                     |  |
| Peso da Isolação Sólida  | 1200 kg                  | 1500 kg                  | 1500 kg                      |  |
| Peso do papel kraft das  | 450 kg                   | 400 kg                   | 400 kg                       |  |
| bobinas dos enrolamentos |                          |                          |                              |  |
| Peso do Núcleo e Bobinas | 27500 kg                 | 23400 kg                 | 23400 kg                     |  |
| Peso do óleo             | 16250 kg                 | 16250 kg                 | 16250 kg                     |  |
| Peso do Tanque e Acessó- | 15100 kg                 | 18850 kg                 | 18850 kg                     |  |
| rios                     |                          |                          |                              |  |
| Volume de óleo total     | 185001                   | 183001                   | 183001                       |  |
| Volume de óleo no tan-   | 153001                   | 161001                   | 161001                       |  |
| que                      |                          |                          |                              |  |
| Volume de Óleo nos radi- | 15001                    | 22001                    | 22001                        |  |
| adores                   |                          |                          |                              |  |

Tabela 7.4 - Características gerais dos transformadores em estudo





Fonte: próprio autor (2016)

A temperatura dos enrolamentos e do óleo é obtida através da coleta dos dados de tensão, corrente, tap, temperatura ambiente, estágio de ventilação, dentre outros, e posterior análise desses dados via *software* CTransf [48].

Para aquisição dos dados de umidade, foram utilizados dois métodos: o primeiro contempla a retirada de amostras de óleo para posterior análise laboratorial, realizando ensaios físicoquímicos e de cromatografia. Nesse método, a temperatura da amostra de óleo é calculada tomando por base a média entre as leituras de temperatura usando um termômetro para imersão em líquidos, um termômetro de junta exposta para contato com a superfície do transformador e um termômetro a laser. O outro método de amostragem é baseado na utilização do sistema Hydrocal 1001+ [10] em conjunto com o *software* Hydrosoft [51]. Esse dispositivo contempla a medição da temperatura do óleo e da concentração de umidade no óleo, bem como a taxa total de gases dissolvidos. Porém, essa última informação não é utilizada nesse trabalho, visto que não é o objetivo de estudo do mesmo.

Para permitir a coleta de dados, um dispositivo de acoplamento em latão foi desenvolvido pela equipe de pesquisa, que permite a aquisição de dados de umidade no óleo através de três meios: a) via coleta de óleo em seringas de vidro e posterior análise laboratorial; b) via sistema Hydrocal 1001+ [10]; e c) via sensor LDH100 [29], que não foi utilizado para coleta de dados deste trabalho. Dois dispositivos de acoplamento foram confeccionados, para instalação nos registros inferior e superior de coleta de óleo em transformadores de potência, conforme mostrado na Figura 6.1. Os dados de umidade no óleo foram coletados no registro inferior via sistema Hydrocal 1001+ e coleta com posterior análise laboratorial. Já no registro superior tais dados foram obtidos somente através de análise em laboratório. A Figura 7.8 ilustra o sistema de aquisição de dados montado em um dos transformadores analisados.

Vale ressaltar que o sistema de coleta de dados, contemplando aquisição de informações de temperatura e umidade no óleo através dos três métodos exibidos no parágrafo anterior, apresenta-se como uma melhoria no processo de coleta de tais dados. Tal constatação pode ser confirmada uma vez que o método tradicional de aquisição de informações consiste somente na amostragem de óleo do registro inferior do transformador, em um intervalo de tempo que pode levar meses. O sistema em desenvolvimento permite o monitoramento em tempo real das informações relativas à umidade, que será usado para análise no MUSPO.

Figura 7.8 – Métodos utilizados em campo para amostragem de dados: a) referente à coleta de informações no fundo do transformador - Sensor Hydrocal 1001+ (elipse vermelha) e registro de coleta de óleo para análise laboratorial (elipse verde); b) referente à coleta de informações no topo do transformador - redução de coleta de óleo para análise laboratorial (elipse azul)



(a)

Fonte: próprio autor (2016)

(b)

7.2.1. Esti Caso 1 – Transformador 3, simulação ur isional
Durante os c 28 de janeiro de 2016, instalou-se no ti nador 3 o sistema de aquisição de dados mostrado na Figura 7.8. Somente o registro inferior de amostra de óleo foi usado, visto que tal instalação foi feita como proposta inicial neste trabalho. Dessa forma, só é possível a utilização do modelo unidimensional. A Tabela 7.5 apresenta os parâmetros que foram usados na simulação. Na tabela, observa-se que o par enrolamento – curva de equilíbrio considerados foram escolhidos por apresentar a maior massa de água no interior do equipamento. Tal consideração é tomada de forma a se agir preventivamente na análise de umidade.

## 7.2.1.1. Refrigeração em modo ONAF-2

Os dados de entrada da simulação compreendem o caso real do transformador em estudo, o qual estava com todos os ventiladores de refrigeração funcionando constantemente (modo ONAF-2). A simulação foi executada em 61,3798 segundos, e a massa total de água no interior do transformador é de 5,5113 kg, considerando a combinação enrolamento primário – Curva de Oommen.

As Figuras 7.9 a 7.14 apresentam, respectivamente, a temperatura do enrolamento e das amostras de óleo, o teor de umidade no óleo, a concentração de água no papel *versus* espessura, variação da concentração de água no papel nas interfaces papel-enrolamento, papel-óleo e valor médio, saturação relativa de água no óleo e a variação das massas totais de água no papel e no óleo.

Na Figura 7.9 nota-se três valores de temperatura, que são usados como parâmetro de entrada para o modelo desenvolvido, conforme mostrado nas Figuras 5.2 e 6.3. O valor previsto pelo CTransf [48] é o considerado como referência, por melhor representar a temperatura do enrolamento.

Analisando a Figura 7.10 nota-se que a variação de água no óleo segue a variação de temperatura, conforme apresentado na análise bibliográfica. Além disso, nota-se que os valores apresentados pelo MUSPO (curva verde) estão dentro da faixa de erro que o Hydrocal apresenta. Assim, se for considerado que o modelo deve apresentar valores dentro do erro do sensor, comprova-se a eficácia da modelagem aqui apresentada. Nota-se também que não foi apresentado o erro de leitura para a umidade no óleo obtida via análise laboratorial. Tal fato ocorre porque durante o processo de coleta de óleo, armazenamento e transporte das seringas e medição via método de Karl-Fischer [28] (ou outro método), podem acontecer vários fatores que causem a alteração do valor real da concentração de água no óleo, tais como contaminação atmosférica, erros de paralaxe, troca de seringas, dentre outros. Desta forma não é possível estimar o erro ligado à medição via análise laboratorial.

| Modelo escolhido                               | Unidimensional         |
|--|------------------------|
| Número de discretizações ao longo da espessura | 50                     |
| Número de discretizações ao longo da altura    | -                      |
| Intervalo de tempo para simulação              | 1 minuto               |
| Quantidade de horas simuladas                  | 48 horas               |
| Enrolamento considerado                        | Primário               |
| Curva de equilíbrio considerada                | Oommen                 |
| Data e hora iniciais da simulação              | 07 de janeiro de 2016, |
|  | 16:40                  |

Tabela 7.5 - Parâmetros de simulação para o Estudo de Caso 1



Figura 7.9 - Temperaturas na base do transformador

Nas Figuras 7.11 e 7.12 são apresentados os valores de concentração de água no papel. Nota-se que tais valores apresentam seu máximo no mesmo período em que a temperatura e a umidade no óleo atingem seu valor mínimo. Verifica-se então a influência direta da temperatura na migração de água no sistema isolante.



Figura 7.11 - Concentração de água no papel ao longo da espessura versus tempo

Figura 7.12 - Concentrações de água no papel nas interfaces versus tempo



Da análise da Figura 7.13 constata-se que, para o estudo de caso apresentado, a chance de formação de água livre no óleo é mínima (aproximadamente 11 %). O valor de saturação relativa apresentado pelo sensor utilizado diverge do calculado pelo modelo, pois apresenta uma razão entre a variação de água no óleo e a temperatura maior do que a informada pelo MUSPO. Além disso, visando uma tomada de decisão baseada no pior caso possível de saturação relativa, a curva que deve ser considerada é a informada pelo *software*.



Figura 7.14 - Massas de água no papel e no óleo versus tempo



Da análise da Figura 7.14, nota-se que quando a massa de água aumenta no papel, a mesma diminui no óleo, e vice-versa. Tal comportamento é esperado, uma vez que a massa total de água no transformador é considerada constante.

#### 7.2.1.2. Interferência da ventilação nos resultados

De forma a se verificar como a ventilação forçada influencia na dinâmica da umidade, três estudos foram realizados, além do estudo em ONAF-2, apresentado na seção anterior. Tais estudos contemplam a ventilação em modo automático (os ventiladores são acionados conforme a variação da demanda de carga), em ONAF-1 (metade dos ventiladores funcionam constantemente), e ONAN (não há circulação forçada de ar). Os resultados são exibidos nas Figuras 7.15 a 7.21, e se referem à combinação das variáveis temperatura no enrolamento primário e curva de Oommen.

Observando a Figura 7.15, nota-se que as maiores temperaturas do enrolamento ocorrem quando a ventilação do transformador está desligada, representada pela situação ONAN. Tal situação é esperada, visto que o objetivo do sistema de refrigeração é auxiliar nas trocas de calor do transformador com o meio ambiente.





O aumento das temperaturas do enrolamento do transformador (originadas principalmente pelo aumento do carregamento) altera o equilíbrio entre umidades relativas no papelóleo, causando a elevação da quantidade de água no óleo. Tal relação é previsível, pois o óleo se torna mais hidrófilo com a elevação de temperatura. Tal comportamento é observado na Figura 7.16.

Através da análise da Figura 7.16, observa-se que a curva que representa a concentração de água no óleo estimada pelo MUSPO encontra-se dentro da faixa de erro que o Hydrocal

1001+ fornece. Dessa forma, os valores do *software* são precisos, quando comparados ao sensor utilizado. Como é difícil precisar uma faixa de erro para os dados obtidos por análise laboratorial, considera-se que esse erro é nulo.

O comportamento da saturação relativa é mais difícil de se prever analisando simplesmente a variação de temperatura no condutor do enrolamento, visto que depende tanto da temperatura como da umidade no óleo. O comportamento de tal parâmetro com a variação da ventilação é observado na Figura 7.17. Observa-se que o valor máximo da saturação relativa encontrado é de aproximadamente 11%, o que implica que a possibilidade de formação de água livre no óleo é mínima.

Figura 7.16 - Concentração de água no óleo



Figura 7.17 - Saturação relativa de água no óleo


Analisando as Figuras 7.18 e 7.19, nota-se que o aumento da temperatura no condutor do enrolamento causa a diminuição da quantidade de água na celulose, na interface papel-óleo, e vice-versa. O teor de umidade no interior do papel acompanha as variações de água na interface papel-óleo. Tal comportamento é explicado baseando-se na hipótese que a massa de água no interior do equipamento permanece constante, e que a elevação de umidade no óleo acompanha a elevação da temperatura. Assim observa-se que no papel tem-se um comportamento de dinâmica de água inverso ao óleo.



Figura 7.18 - Concentração de água no papel, na interface papel-óleo

Figura 7.19 - Concentração de água no papel, na interface papel-enrolamento



A variação das massas de água no óleo e no papel é observada pela análise das Figuras 7.20 e 7.21, e são proporcionais aos teores de umidade nesses meios, conforme mostrado em (5.17) e (5.18).



Figura 7.20 - Massa total de Água no Óleo





São apresentados na Tabela 7.6 os valores máximos e mínimos para o estudo de caso desta seção. Os valores realçados em vermelho são os maiores valores do parâmetro relacionado. Da mesma forma, os valores em azul se referem aos mínimos encontrados. Analisando a Tabela 7.6, observa-se que a simulação que obteve maior quantidade de água no transformador é a relativa à ONAF2, tendo como contrário a simulação do caso da refrigeração em ONAN. Tal variação é devida à oscilação de temperatura nos enrolamentos, uma vez que a concentração de água no óleo no instante inicial é a mesma para todos os casos.

|                                     |              |         | Sistema de | e Refrigeração |            |
|-------------------------------------|--------------|---------|------------|----------------|------------|
|                                     |              | ONAF 2  | ONAF 1     | ONAN           | AUTOMATICC |
| Temperatura no fundo do Enrolamento | Valor Máximo | 42,5162 | 47,1796    | 56,7073        | 48,5136    |
| [ 0]                                | Valor Mínimo | 19,9854 | 23,2486    | 31,4457        | 30,7437    |
| Concentração de Água no Papel [%]   | Valor Máximo | 3,1959  | 2,9067     | 2,3413         | 2,5077     |
|                                     | Valor Mínimo | 2,6928  | 2,4053     | 1,8576         | 2,1588     |
| Concentração de Água no Óleo [ppm]  | Valor Máximo | 14,4676 | 14,5759    | 14,6904        | 13,0189    |
|                                     | Valor Mínimo | 5,4920  | 5,4595     | 5,9500         | 6,6263     |
| Massa de Água no Papel [kg]         | Valor Máximo | 7,2673  | 6,5407     | 5,1706         | 5,8135     |
|                                     | Valor Mínimo | 7,0923  | 6,3629     | 5,0002         | 5,6888     |
| Massa de Água no Óleo [g]           | Valor Máximo | 282,1   | 284,2      | 286,5          | 253,9      |
|                                     | Valor Mínimo | 107,1   | 106,5      | 116,0          | 129,2      |
| Saturação Relativa [%]              | Valor Máximo | 11,7113 | 10,0537    | 7,4118         | 8,4320     |
|                                     | Valor Mínimo | 9,6361  | 8,2887     | 5,9779         | 7,0298     |

Tabela 7.6 - Comparação entre simulações

7.2.2. Estudo de Caso 2 - Transformador 2 - Simulação Unidimensional

Durante os dias 19 a 25 de fevereiro de 2016, o sistema de aquisição de dados completo foi reinstalado no Transformador 02, desta vez contemplando a coleta de amostras nos registros inferior e superior. Para a simulação unidimensional, a espessura do papel foi discretizada em 80 células, e os valores das massas de água no transformador são exibidos na Tabela 7.7.

As Figuras 7.22 a 7.26 apresentam os gráficos obtidos para o estudo de caso 2. Da análise da Tabela 7.7, nota-se que a combinação que gerou maior massa de água é a considerando enrolamento primário e curva de Oommen. Logo, os gráficos subsequentes se referem a tal combinação.

Tabela 7.7 - Massas de água no transformador 2 - Estudo de Caso 2

| Curva de ajuste e enrolamento | Fabre-Pichon | Oommen    |
|-------------------------------|--------------|-----------|
| Primário                      | 2,5283 kg    | 3,8312 kg |
| Secundário                    | 2,2028 kg    | 3,0867 kg |



Figura 7.22 – Temperaturas do enrolamento e óleo para o Estudo de Caso 2

Novamente nota-se a divergência entre os valores de temperatura colhidos em campo com os valores apontados pelo *software* de carregamento de transformadores, observando a Figura 7.22. A resposta considerada correta é a do CTransf [48] (curva verde), e foi considerada nos cálculos de dinâmica da umidade.

Da análise da Figura 7.23, comprova-se a precisão do modelo apresentado neste trabalho, visto que este gera resultados para concentração de água no óleo (curva verde) que tem comportamento iguais ao observados em campo (curvas vermelhas e pontos azuis), tanto em valores absolutos quanto nas taxas de variação.

Diferente do Estudo de Caso 1, os valores de saturação relativa obtidos em campo foram superiores aos calculados pelo modelo, conforme nota-se na Figura 7.24. Apesar disso, a diferença entre esses valores pouco influencia na tomada de decisão por parte do engenheiro de manutenção. A taxa de variação é similar para os dois conjuntos de dados, e confirma a eficiência do modelo matemático.



Figura 7.23 - Concentração de água no óleo para o Estudo de Caso 2

Figura 7.24 - Saturação Relativa de água no óleo para o Estudo de Caso 2



Observando a Figura 7.25, nota-se que a região no papel onde houve maior variação da concentração de água é na interface papel-óleo e vizinhanças. Nota-se também que a variação de umidade no papel segue o comportamento inverso ao que acontece no óleo, alternando valores máximos em um meio com valores mínimos em outro. Tal fato também pode ser comprovado analisando a Figura 7.26.



Figura 7.25 - Concentração de água no papel para o Estudo de Caso 2

Figura 7.26 – Massas de água no papel e no óleo para o Estudo de Caso 2



7.2.3. Estudo de Caso 3 - Transformador 2 - Simulação Bidimensional

Além do exposto na seção 7.2.2, uma simulação bidimensional foi realizada, considerando os mesmos dados de concentrações de água no óleo. O papel foi discretizado em 50 células ao longo da espessura, e 30 ao longo da altura. A Tabela 7.8 apresenta as massas de água para a simulação. Novamente nota-se que a combinação enrolamento primário e curva de Oommen apresentou o maior valor de massa de água, logo os gráficos subsequentes se referem a tal combinação.

| Curva de ajuste e enrolamento | Fabre-pichon | Oommen    |
|-------------------------------|--------------|-----------|
| Primário                      | 3,3486 kg    | 5,0343 kg |
| Secundário                    | 2,9068 kg    | 4,1730 kg |

| l'abela 7.8 - Massas de água no transformador 2 – Estudo de Caso |
|--|
|--|

Como a simulação bidimensional envolve quatro variáveis (duas coordenadas de distância, uma variável temporal e uma relativa à concentração), duas análises foram feitas. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras 7.27 a 7.30, considerando a análise para uma altura igual a 1,53 m a partir do fundo do enrolamento.

Analisando a Figura 7.27, nota-se uma diferença entre as temperaturas informadas pelo CTransf [48], pelo Hydrocal [10] e pelos métodos laboratoriais realizados na empresa CELG Distribuição. A curva considerada correta é a informada pelo *software* CTransf [48], por melhor representar a dinâmica térmica nos condutores do enrolamento.

As informações da concentração de água no óleo são mostradas na Figura 7.28. Comparando-se a resposta do MUSPO no fundo do transformador com os dados do Hydrocal, nota-se uma diferença entre tais valores, apesar das variações desses valores serem as mesmas. Tal divergência pode ser explicada pelo aumento da afinidade do óleo e da água, com o aumento da temperatura. Como o MUSPO modela a umidade do óleo na vizinhança do condutor, este é mais quente do que o óleo que está na região do registro de amostra, que tem sua umidade medida pelo Hydrocal. Logo, o óleo nas vizinhanças do condutor é mais contaminado de água do que o óleo na região do registro. Os valores obtidos em laboratório para o registro inferior corroboram as informações apresentadas pelo modelo apresentado.

A variação da umidade no óleo no registro superior pode ser observada pela curva vermelha na Figura 7.28. Os valores obtidos em laboratório para o registro superior são próximos dos valores obtidos pelo *software* MUSPO, o que comprova a precisão do modelo matemático apresentado neste trabalho.

### Figura 7.27 – Temperatura do condutor a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo



de Caso 3

Figura 7.28 – Concentração de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de Caso 3



Observando a Figura 7.29, nota-se que os valores de saturação relativa apresentados pelo MUSPO são maiores do que os obtidos via Hydrocal e métodos laboratoriais. Apesar disso, a diferença entre os valores não é significativa, e não significam grande probabilidade de formação de água livre no óleo. Observa-se também um pico de valor no final da simulação. Tal pico pode ser eliminado com o aumento da discretização do papel, ao longo da altura, ao custo do aumento de recursos computacionais.





O comportamento da variação de água no papel segue o inverso do comportamento da variação de água no óleo, apresentando valores máximos de umidade na celulose no mesmo momento que ocorrem os "vales" na curva de concentração de água no óleo, conforme nota-se na Figura 7.30.

Outra representação da simulação é apresentada nas Figuras 7.31 a 7.33, exibindo as variáveis para o momento da segunda coleta de dados.



Figura 7.30 – Concentração de água no papel a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de Caso 3

Figura 7.31 – Perfil da concentração de água no óleo para a segunda coleta de dados – Estudo de Caso 3





Figura 7.32 – Perfil da concentração de água no papel para a segunda coleta de dados – Estudo de Caso 3

Como o óleo nas vizinhanças do condutor é mais quente e mais úmido do que o óleo na região do registro de coleta, o comportamento observado na Figura 7.31 está condizente com o esperado. Da análise da Figura 7.32, nota-se que o papel se encontra mais úmido na região superior e na interface com o óleo. Dessa forma, é nessa área onde se espera encontrar a maior massa de água no transformador.

O perfil de temperatura no condutor é apresentado na Figura 7.33. A curva em vermelho representa a temperatura conforme sugerido por Nadabi [18]. A temperatura apresentada pelo Hydrocal, na região inferior do transformador, é maior do que a temperatura informada pelo CTransf [48] na mesma região, devido ao tempo de resposta maior do sensor, que pode ser observado também na Figura 7.27. As diferenças entre os valores de temperaturas obtidos pela média dos termômetros de sonda, imersão e pistola térmica, quando comparados com o CTransf, são atribuídas a erros oriundos de paralaxe e da utilização de tais equipamentos.





7.2.4. Estudo de Caso 4 – Transformador 3 – Simulação Unidimensional

Durante os dias 25 de fevereiro a 4 de março de 2016, o sistema de aquisição de dados completo foi instalado no Transformador 3. São exibidos na Tabela 7.9 as massas de água no transformador, para cada combinação de enrolamento e curva. Os resultados são ilustrados nas Figuras 7.34 a 7.34. Novamente a combinação enrolamento primário e curva de Oommen apresentou maior massa de água no transformador, e, portanto, os gráficos subsequentes se referem a tais escolhas.

Tabela 7.9 - Massas de água no transformador 3 - Estudo de Caso 4

| Curva de ajuste e enrolamento | Fabre-Pichon | Oommen    |
|-------------------------------|--------------|-----------|
| Primário                      | 3,2585 kg    | 4,8040 kg |
| Secundário                    | 2,8730 kg    | 4,0187 kg |



Figura 7.34 – Temperaturas do enrolamento e do óleo – Estudo de Caso 4

Observa-se nas Figuras 7.35 e 7.36, no instante inicial, um valor elevado de concentração de umidade em óleo e saturação relativa. Tal pico de valor foi causado por uma contaminação de umidade oriunda do ar atmosférico, no momento da transferência do sensor de um transformador para outro. Apesar disso, nota-se que o valor estabiliza após um certo período. Além disso, os valores informados pelo MUSPO encontram-se dentro da faixa de erro do Hydrocal, mostrando a precisão do modelo.

A concentração de água no papel segue o comportamento inverso da umidade no óleo, conforme apresentado nos estudos de casos anteriores. Tal comportamento é observado nas Figuras 7.37 e 7.38.



Figura 7.35 - Concentração de água no óleo - Estudo de Caso 4

Figura 7.36 - Saturação Relativa de Água no Óleo - Estudo de Caso 4





Figura 7.37 - Concentração de água no papel - Estudo de Caso 4

Figura 7.38 – Massas de água no óleo e no papel – Estudo de Caso 4



#### 7.2.5. Estudo de Caso 5 – Transformador 3 – Simulação Bidimensional

Além do exposto na seção 7.2.4, uma simulação bidimensional foi realizada considerando os mesmos dados. O papel foi discretizado em 40 células ao longo da espessura, e 30 ao longo da altura. As massas de água totais para a simulação são apresentadas na Tabela 7.10.

| Curva de ajuste e enrolamento | Fabre-Pichon | Oommen    |
|-------------------------------|--------------|-----------|
| Primário                      | 3,4603 kg    | 5,0237 kg |
| Secundário                    | 3,1015 kg    | 4,2888 kg |

Tabela 7.10. Massas de água no transformador 3 – Estudo de Caso 5

Os resultados da simulação são ilustrados nas Figuras 7.39 a 7.42, considerando a análise para uma altura de 1,53 m a partir do fundo do enrolamento. Novamente nota-se a diferença entre os valores de temperatura apresentados pelo CTransf e pelo Hydrocal, na Figura 7.39. Também nota-se que a concentração de água no óleo informada pelo MUSPO tem seus valores divergentes dos retornados pelo Hydrocal, porém as variações desses valores são similares.

Figura 7.39 – Temperatura do condutor a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo

de Caso 5





# Figura 7.40 – Concentração de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Es-

Nota-se também uma divergência nos valores de saturação relativa de água no óleo obtidos entre o MUSPO e o Hydrocal, conforme se observa na Figura 7.41.

Figura 7.41 – Saturação relativa de água no óleo a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de Caso 5



Tempo [HH:MM]



Figura 7.42 – Concentração de água no papel a 1,53 m de altura do fundo do enrolamento – Estudo de Caso 5

A concentração de água no papel segue comportamento inverso ao da concentração de água no óleo, conforme pode ser observado comparando as Figuras 7.40 e 7.42. Nota-se que com o aumento da temperatura do óleo, este se torna mais hidrófilo, fazendo a água migrar do papel para o óleo. No caso da diminuição de temperatura do óleo, o raciocínio contrário é aplicado, chegando a uma conclusão que ocorre uma migração de água no sentido óleo-papel.

Os resultados da simulação, ilustrando as variáveis para o momento da terceira coleta de dados, são exibidos nas Figuras 7.43 a 7.45. Nota-se que o óleo na região do enrolamento, conforme indicado pelo MUSPO, é mais úmido do que o óleo na região do registro de coleta, conforme pode ser observado na Figura 7.43.

Também se observa que a região mais úmida do papel fica na interface papel-óleo, na parte superior do enrolamento, conforme mostra a Figura 7.44. Tal comportamento também foi observado no Estudo de Caso 3.

As diferenças de temperatura entre o CTransf [48], o Hydrocal [30] e os termômetros utilizados ficam evidentes na Figura 7.45, e têm a mesma explicação apresentada no Estudo de Caso 3.



Figura 7.43 – Perfil da concentração de água no óleo na terceira coleta de dados – Estudo de

Caso 5

Figura 7.44 – Perfil da concentração de água no papel na terceira coleta de dados – Estudo de Caso 5



Figura 7.45 – Perfil da temperatura do condutor do enrolamento na terceira coleta de dados – Estudo de Caso 5



7.2.6. Estudo de Caso 6 – Transformador 1 – Simulação Unidimensional

Durante os dias 4 a 10 de março de 2016, o sistema de aquisição de dados completo foi instalado no Transformador 1. Os resultados obtidos para a simulação unidimensional são ilustrados nas Figuras 7.46 a 7.50, e os valores obtidos para as massas de água no transformador são apresentados na Tabela 7.11. Nota-se, na Figura 7.46, a diferença entre os valores de temperatura trabalhados. Considera-se como referência o valor obtido pelo CTransf [48].

| Curva de ajuste e enrolamento | Fabre-Pichon | Oommen    |
|-------------------------------|--------------|-----------|
| Primário                      | 4,0036 kg    | 5,8595 kg |
| Secundário                    | 3,7597 kg    | 5,3995 kg |

Tabela 7.11 - Massas de água no transformador 1 – Estudo de Caso 6



Figura 7.46 – Temperaturas do condutor do enrolamento e do óleo – Estudo de Caso 6

Analisando a Figura 7.47, nota-se um "defasamento" entre a curva de umidade gerada pelo MUSPO e a informada pelo Hydrocal, porém os valores estão próximos entre si. Tal divergência é explicada pela idade do transformador 1, que data de 1993. Assim, o papel do transformador está mais envelhecido, e possivelmente tem um valor de coeficiente de difusão D diferente dos demais. Logo a dinâmica de umidade é alterada, quando comparado com os transformadores 2 e 3.

Figura 7.47 – Concentração de água no óleo – Estudo de Caso 6



Os valores obtidos de saturação relativa pelo MUSPO são próximos dos encontrados pelo

Hydrocal e pelo laboratório, e confirmam a funcionalidade do método. Tais valores são exibidos na Figura 7.48.



Figura 7.48 - Saturação relativa de água no óleo - Estudo de Caso 6

Observando a Figura 7.49 e comparando-a com a Figura 7.47, nota-se o aumento da umidade no papel com o decréscimo da umidade no óleo, conforme pode ser observado também na Figura 7.50



Figura 7.49 – Concentração de água no papel – Estudo de Caso 6



Figura 7.50 – Massas de água no óleo e no papel – Estudo de Caso 6

Não foi possível executar uma simulação bidimensional do transformador 1, visto que as amostras de óleo do registro superior foram perdidas, durante o ensaio de cromatografia das mesmas.

#### 7.3. Conclusões

Analisando os valores exibidos nesse capítulo, conclui-se que os resultados obtidos pelo *software* MUSPO se aproximam dos valores que os dois métodos de coleta apresentaram. A modelagem apresentada nessa dissertação proporciona resultados compatíveis aos apresentados por Zhou *et.al.*, corroborando o que é apresentado neste do trabalho.

Para as respostas encontradas pelo modelo unidimensional, em especial nos estudos de caso em que os transformadores de potência da CELG Distribuição são analisados, nota-se que a curva de concentração de umidade no óleo do MUSPO encontra-se dentro da faixa de erro que o Hydrocal apresenta. Além disso, comprova-se que, no papel, a região onde acontece maior variação de umidade é na interface com o óleo. Tal comportamento é esperado, uma vez que é nessa região onde ocorre, no papel, a maior migração de umidade. Além disso, o condutor do enrolamento (usualmente cobre ou alumínio) é uma superfície em que não ocorre penetração de umidade.

Já para o modelo bidimensional, é necessário realizar uma análise mais aprofundada. Considerando-se primeiramente o papel, observa-se que para os transformadores em estudo, a região onde o teor de umidade é maior localiza-se na parte superior do enrolamento e na interface com o óleo. Tal comportamento parece ser, em um primeiro momento, contrário ao que se esperava, em que se imaginaria mais umidade na região inferior do enrolamento, por ser ali uma região de temperaturas mais baixas. Apesar disso, o resultado obtido pelo MUSPO é correto, considerando os seguintes argumentos:

- a) Como a temperatura (enrolamento, papel e óleo) é maior na parte superior em relação à parte inferior do enrolamento, o valor do coeficiente de difusão, e consequentemente da velocidade de difusão de umidade no papel, é maior no topo do enrolamento. Logo, a água vai se deslocar mais rapidamente no topo do que no fundo;
- b) No topo do enrolamento, a concentração de água no óleo é maior do que no fundo. Baseado no argumento anterior, constata-se que a variação de umidade no óleo na parte superior é maior do que na parte inferior. Nesse ponto é interessante fazer uma analogia com a temperatura do enrolamento, que possui comportamento similar ao apresentado pela água no óleo. Como a dinâmica de umidade é influenciada pela variação de temperatura, então tais comportamentos similares são esperados;
- c) Para os três transformadores em estudo, nota-se que no instante inicial a combinação entre temperatura e umidade no óleo, quando aplicados às curvas de Fabre-Pichon e Oommen, geram valores tais que a umidade no papel na parte superior é maior do que na parte inferior. Tal comportamento é apresentado na Tabela 7.12, sendo  $C_{óleo}$  a concentração de água no óleo,  $\theta$  a temperatura e  $C_{papel}$  a concentração de água no papel.

|     | Registro Inferior  |              |             | Registro Superior  |            |                    |  |
|-----|--------------------|--------------|-------------|--------------------|------------|--------------------|--|
|     | $C_{\acute{o}leo}$ | θ            | $C_{papel}$ | $C_{\acute{o}leo}$ | θ          | C <sub>papel</sub> |  |
| TR2 | 6,9500 ppm         | n 44,6249 °C | 1,7240 %    | 12,2800 ppm        | 48,2897 °C | 2,1237 %           |  |
| TR3 | 9,7875 ppm         | n 47,8801 °C | 1,8947 %    | 12,9167 ppm        | 51,6593 °C | 1,9841 %           |  |
| TR1 | 11,725 ppm         | n 51,0651 °C | 1,9082 %    | 2                  |            |                    |  |

Tabela 7.12 - Valores de equilíbrio para o instante inicial.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Valores ausentes devido à perda de informações das amostras no registro superior, durante outros ensaios

d) Finalmente, analisando a variação das massas de água no papel e no óleo, com o auxílio da Tabela 7.13, nota-se que para o transformador 2, por exemplo, a variação de água no papel foi de 307,8 g, para um valor médio de 4,609 kg. Em valores percentuais, essa variação é muito pequena (aproximadamente 0,10% de concentração) para causar um deslocamento de água no papel, da parte superior para a parte inferior.

|               |                        | TR2 - 1D | TR2 - 2D | TR3 - 1D | TR3 - 2D | TR1 - 1D |
|---------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Massa de Água | Máximo                 | 3,7764   | 4,916    | 4,7373   | 4,8747   | 5,7738   |
| no Papel (kg) | Mínimo                 | 3,6617   | 4,301    | 4,6101   | 4,4472   | 5,5874   |
|               | Médio                  | 3,719    | 4,609    | 4,674    | 4,661    | 5,681    |
|               | Variação Máxima<br>(g) | 57,350   | 307,800  | 63,600   | 213,750  | 93,200   |
| Massa de Água | Máximo                 | 169,4696 | 732,992  | 193,1843 | 573,9938 | 270,0835 |
| no Oleo (g)   | Mínimo                 | 54,7705  | 117,017  | 66,6982  | 146,8253 | 85,6796  |
|               | Médio                  | 112,120  | 425,005  | 129,941  | 360,410  | 177,882  |
|               | Variação Máxima<br>(g) | 57,350   | 307,987  | 63,243   | 213,584  | 92,202   |

Tabela 7.13 - Massas de água totais no papel e no óleo.

Finalmente, analisando as curvas de umidade em óleo, nota-se que a resposta da modelagem apresenta valores próximos aos informados pelos sensores. Tal fato comprova a eficiência do método dissertado, e demonstra sua aplicação em transformadores de potência. Além disso, a ferramenta permite predizer níveis máximos e mínimos dos parâmetros estudados, o que possibilita relacionar o carregamento do equipamento com tais variáveis. Os valores extremos dos parâmetros de umidade, nos estudos de caso considerados, são apresentados na Tabela 7.14. Nota-se que o maior valor da saturação relativa obtido para todos os estudos de caso vale 34,2678 %, inferior ao limite de 100%, e, portanto, não há possibilidade de formação de água livre no óleo em nenhum dos transformadores de potência analisados.

|                                      |        | Estudos de Caso |            |            |            |            |  |
|--------------------------------------|--------|-----------------|------------|------------|------------|------------|--|
|                                      | Valor  | Tr. 2 – 1D      | Tr. 2 – 2D | Tr. 3 – 1D | Tr. 3 – 2D | Tr. 1 – 1D |  |
| Concentração de Água<br>no Papel [%] | Máximo | 2,0959          | 5,0724     | 2,2159     | 4,1973     | 2,4391     |  |
|                                      | Mínimo | 1,323           | 0,0536     | 1,7235     | 0,0626     | 1,8356     |  |
|                                      | Máximo | 7,6203          | 46,9639    | 9,9406     | 33,6947    | 13,953     |  |

Tabela 7.14 - Comparação entre simulações.

| Concentração de Água<br>no Óleo [ppm] | Mínimo | 3,9758 | 4,3636  | 3,4204 | 6,4003  | 4,3938 |
|---------------------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Saturação Relativa [%] —              | Máximo | 6,0837 | 34,2678 | 6,5941 | 19,9133 | 7,779  |
|                                       | Mínimo | 3,3814 | 4,7837  | 4,8072 | 5,9503  | 5,6255 |

## Capítulo 8 – Conclusões e Considerações Finais

O monitoramento dos níveis de umidade em sistemas isolantes de transformadores de potência é de fundamental importância, principalmente quando se considera a importância e custo desses equipamentos na transmissão de energia elétrica. Altos níveis de umidade podem causar danos, tais como formação de bolhas, diminuição da rigidez elétrica e mecânica do papel, e envelhecimento do sistema isolante.

Tal acompanhamento pode ser realizado por meio da coleta periódica de amostras de óleo e posterior análise laboratorial. Também pode ser feito com a instalação de sensores nos equipamentos em que o monitoramento é desejado. Porém, o acompanhamento por meio de simulações computacionais se destaca por permitir monitorar tais níveis com poucas amostras, ou somente uma. Tal fato é interessante quando se observa que ocorre uma redução de custos para executar tal tarefa, levando em conta gastos com material, logística e pessoal que seriam necessários caso seja de interesse o monitoramento através da instalação de sensores. Além disso, é possível a simulação de casos que são impraticáveis com o transformador em serviço, tais como aumento, perda súbita de carga ou alteração do sistema de refrigeração.

O ajuste das curvas de equilíbrio de umidade de Fabre-Pichon e Oommen através da programação genética foi eficaz, e permite ao usuário das equações fácil implementação em qualquer linguagem computacional. Os erros obtidos estão na mesma ordem de grandeza dos erros encontrados pelo ajuste polinomial. Apesar disto, é recomendado o ajuste por interpolação quando possível, por retornar resultados mais confiáveis do que o ajuste por programação genética.

Da análise do que foi exposto nos capítulos, em especial as conclusões tomadas na validação de dados, comprova-se que os modelos unidimensional e bidimensional são eficazes na predição dos níveis de umidade e variáveis correlatas, em transformadores de potência. Dessa forma, as ferramentas apresentadas nesse trabalho fornecem uma contribuição qualitativa e quantitativa aos estudos existentes.

A grande vantagem da simulação unidimensional é o reduzido esforço computacional na obtenção de resultados. Por outro lado, o modelo bidimensional possui a capacidade de fornecer informações mais completas e mais realistas, principalmente por analisar a variação da umidade ao longo da altura. É recomendada a utilização da simulação unidimensional apenas nos casos de equipamentos que possuam somente um registro para coleta de óleo, ou em casos que é

difícil a obtenção de valores no registro superior. Caso contrário, recomenda-se o estudo considerando as duas simulações, visando uma análise mais completa. Por exemplo, observando a Tabela 7.14 constata-se que, para os transformadores em estudo, os níveis de umidade no óleo e no papel são maiores no registro superior. Assim, a tomada de decisão considerando um modelo em preferência a outro pode causar interpretações equivocadas sobre a vida do equipamento, tais como a intervenção antes da hora, ou a energização de transformadores com níveis alarmantes de umidade.

Apesar de que os níveis de umidade foram maiores na região superior do equipamento, para os estudos de caso, não se deve tomar essa ocorrência como regra geral. Podem existir equipamentos onde o fundo do enrolamento é a região mais crítica em termos de umidade, e consequentemente em níveis de degradação. Dessa forma o estudo de cada equipamento como único é sugerido. Quando houver posse de uma massa de dados volumosa, é sugerido a criação de "famílias" de transformadores, que são conjuntos de equipamentos com características e níveis de umidade similares.

Tomando os estudos de caso como exemplos, nota-se que a possibilidade de formação de água livre no óleo é mínima para os transformadores 2 e 3, uma vez que os valores máximos de saturação relativa são inferiores ao limite de 100%, conforme é exibido na Tabela 7.14. Dessa forma, não é interessante, do ponto de vista econômico, realizar tratamentos de secagem nesses equipamentos. Para o transformador 1, que teve seu estudo realizado considerando somente o modelo unidimensional, comprova-se a boa saúde do equipamento, do ponto de vista de umidade. É sugerido nova aquisição de dados no equipamento, com vistas a realização de uma simulação mais completa.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se:

- a) Definição de um equacionamento único para o cálculo da saturação relativa de água no óleo, pressão de vapor de água e coeficiente de difusão, cujos resultados são dependentes de constantes relacionadas a características do equipamento. Tais constantes devem ser facilmente obtidas por meio do levantamento das características construtivas, como massas e dimensões, e também através de histórico de ensaios;
- b) Aprimoramento da modelagem matemática, levando em consideração diferenças na temperatura e teor de umidade que existem entre as camadas de óleo que circundam o enrolamento e as vizinhas aos registros do transformador;
- c) Estudo de técnicas diferentes para resolver as equações que modelam o fenômeno, tais como a utilização do método dos elementos finitos ou o método das diferenças

finitas no domínio do tempo. Tais técnicas devem objetivar a melhoria nos resultados, aliado à diminuição do gasto de recursos computacionais.

- d) Inclusão de novos parâmetros relacionáveis à saúde do transformador, tais como: possibilidade de formação de bolhas, evolução da rigidez dielétrica do óleo, grau de polimerização da celulose, e principalmente perda de vida útil associada a presença de água.
- e) Formação de um banco de dados visando a classificação de transformadores por "famílias" de equipamentos.

Frente ao apresentado, uma ferramenta de análise foi desenvolvida, que fornece informações e embasa a tomada de decisões sobre a intervenção em equipamentos. Desta forma conclui-se trabalho atingiu todos os objetivos. Nesse são contemplados o desenvolvimento de uma nova ferramenta matemática e a inovadora estratégia de monitoramento de umidade ao longo do volume de transformadores.

### Referências

 [1] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional - PRODIST - Módulo 8
- Qualidade da Energia Eétrica. ANEEL. [S.1.], p. 75. 2008.

[2] FRONTIN, S. O. EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasilia: [s.n.], 2013.

[3] AZEVEDO, C. H. B. Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção de transformadores de potência imersos em óleo isolante. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 92. 2009.

[4] SULEIMAN, A. A. et al. Improving accuracy of DGA interpretation of oil-filled power transformers needed for effective condition monitoring. **IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**, Bali, 2012. 5.

[5] CIGRÉ WG A2.30. Moisture equilibrium and moisture migration within Transformer insulation systems. CIGRE. [S.1.]. 2008.

[6] MARQUES, A. P. Eficiência Energética e Vida Útil de Transformadores de Distribuição imersos em Óleo Mineral Isolante (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 182. 2004.

[7] SOUSA, F. R. D. C. Monitoramento de Umidade em Sistemas Isolantes Papel-Óleo de Transformadores de Potência (Projeto Final de Curso). Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2013.

[8] SOUSA, F. R. D. C. et al. Monitoramento de umidade em sistemas isolantes papelóleo de transformadores de potência. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçú, 22 a 25 Abril 2014. 6.

[9] MARQUES, A. P. et al. A Mathematical Contribution to the Analysis of Moisture MIgration in Power Transformer Oil-Paper Insulation Systems. IEEE Symposium on Diagnostics for Eletric Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, Portugal, 1-4 September 2015. 6.

[10] MTE - METER TEST EQUIPMENT. **HYDROCAL 1001+ Analisador de gases** compostos no óleo com sensor de umidade. MTES. São Paulo - SP, p. 2. 2013.

[11] ZHOU, L. J.; WU, G. N.; LIU, J. **Modeling of Transient Moisture Equilibrium in Oil-paper Insulation**. IEEE Transactions on Dieletric and Electrical Insulation, 2008. [12] HRIBERNIK, W.; PASCOLI, G.; FROHLICH, K. An advanced model-based diagnosis system for online detection of the moisture content of power transformer insulations. IEEE Electrical Insulation, 2008.

[13] JEONG, G. Y. et al. Magnetic-Thermal-Fluidic Analysis for Cooling Performance of Magnetic Nanofluids Comparing With Transformer Oil and Air by Using Fully Coupled Finite Element Method. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, v. 49, n. 5, p. 4, Maio 2013.

[14] LU, G. et al. Influences of Moisture Content on Insulation Properties of Vegetable Insulation Oil. 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Poznan, p. 4, Setembro 2014.

[15] CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. NTC 36 - Norma Técnica CELG - Transformador de Potência - Especificação - Revisão 6. CELG Distribuição S.A. Goiânia, p. 89. 2015. Disponível em https://www.celg.com.br/arquivos/dadosTecnicos/normasTecnicas/NTC36.pdf. Acesso em 24 de junho de 2016.

[16] CIGRÉ WG A2.50. Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. Brasil: CIGRÉ BRASIL, 2013.

[17] SU, X. et al. A Numerical Method to Calculate Winding Temperature Distribution for Oil Immersed Transformers. High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on. Poznan: [s.n.]. 2014. p. 4.

[18] NADABI, A.; AL-RIYAMI, H. **Design a Simulation Model to Estimate the Hot Spot Temperature in Power Transformers**. 6° IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, Djerba - Tunisia, 23-26 Março 2009. 5.

[19] SOKOLOV, V.; MAK, J.; FILHO, A. B. Estudo sobre a Influência da Umidade na Possibilidade de Falha de Transformadores. [S.l.], p. 46. 2000.

[20] DU, Y. et al. **Moisture Solubility for Differently Conditioned Transformer Oils.** IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, v. 8, Outubro 2001.

[21] DU, Y. et al. Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999.

[22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5416: Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência. Rio de Janeiro, p. 73. 1997.

[23] OOMMEN, T. V. Moisture equilibrium charts for transformer insulation drying practice. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984. 6.

[24] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10710: Líquidos Isolantes Elétricos: Determinação do Teor de Água. Rio de Janeiro: [s.n.], 1989. [25] OOMMEN, T. V.; LINDGREN, S. R. **Bubble Evolution from Transformer Overload**. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES , Atlanta, GA, v. 1, p. 137 - 142 , October 2001.

[26] KOCH, M. Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005. 6.

[27] LI, X. et al. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on , Montreal, 14-17 Outubro 2012. 835-838.

[28] BAUR PRÜF- UND MESSTECHNIK. **BAUR Insulating Fluids Testing.** Raiffeisenstraße, p. 20.

[29] IFM SISTEMAS DE DIAGNÓSTICOS. **LDH100 - Oil Humidity Sensor**. IFM Sistemas de Diagnósticos. [S.l.], p. 2.

[30] MTE - METER TEST EQUIPMENT. **HYDROCAL 1001+ - Analisador de gases compostos no óleo com sensor de umidade**. BOHNEN + MESSTEK. São Paulo, p. 2. 2013.

[31] TOSHIBA INFRAESTRUTURA AMÉRICA DO SUL LTDA. Manual de Instruções - Transformador de Potência. TOSHIBA. Contagem - MG. 2015.

[32] WILKINSON, M. D.; DYER, P. Gerenciamento contínuo de umidade: como estender a vida útil dos transformadores. Revista Eletricidade Moderna, p. 7, Fevereiro 2003.

[33] VELCON SYSTEMS. **Transformer Dryout System - TDS5AB**. Velcon Systems. [S.l.], p. 2. 2001.

[34] AVI-MACH EQUIPAMENTOS E PEÇAS LTDA / VELCON SYSTEMS. Máquina de Secagem de Transformador Tipo SST5. Diadema - SP, p. 2.

[35] VELCON SYSTEMS. **Tap Changer Filter System - TP3**. Velcon Systems. Colorado Springs. 2002.

[36] SANTOS, T. A. M. D.; MARQUES, A. P. Desidratação de Óleo e Secagem da Parte Ativa de Transformadores de Potência. Relatório Interno - CELG Disribuição S.A. [S.l.]. 2014.

[37] BROWNLEE, J. Clever algorithms: nature-inspired programming recipes. [S.l.]: [s.n.], 2011.

[38] HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introdução à Pesquisa Operacional. [S.l.]: McGraw Hill, 2010.

[39] LINDEN, R. Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional. São Paulo: Brasport, 2006.

[40] KOZA, J. R. Genetic Programming: on the programmin of computers by means of natural selection. MIT Press, 1992.

[41] BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. Análise Numérica. São Paulo: Pioneira Thomsom Learning, 2003.

[42] CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Numerical Methods for Engineers. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc., v. Único, 1988.

[43] ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática. 4<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

[44] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 5<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

[45] BAH, T. Inkscape: Guide to a Vector Drawing Program (Digital Short Cut).[S.1.]: Pearson Education, 2009.

[46] SEARSON, D. **GPTips: Genetic programming & symbolic regression for Matlab**. [S.1.]: Disponível em gptips.sourceforge.net. Acesso em 19 de maio de 2015.

[47] MATHWORKS. Matlab User's Guide. [S.l.]: [s.n.], 1998.

[48] MARQUES, A. P.; MARQUES, F. P. Software CTransf -- Carregamento de Transformadores, modelagem térmica. versão 2.5. Goiânia. 2001.

[49] BURDEN, R. L.; FAIRES, D. Análise Numérica. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

[50] CUNHA, M. C. C. Métodos Numéricos. 2<sup>a</sup>. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2000.

[51] MTE - METER TEST EQUIPMENT. Hydrosoft - Software for Transformer Monitoring with Hydrocal Units - Operation Manual. MTE Meter Test Equipment AG. Switzerland, p. 94. 2015.

[52] ZHOU, L. J.; WU, G. N.; LIU, J. **Modeling of transient moisture equilibrium in oil-paper insulation**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008.

[53] TIMBÓ PAPEIS ESPECIAIS. **PRESSPAN TIMBÓ 3051**. TIMBÓ Papeis Especiais. Timbó - SC. 2015.