

## DIAGNÓSTICOS DE GASES EM ÓLEO ISOLANTE DE REGULADORES E TRANSFORMADORES

### *GAS DIAGNOSTICS IN INSULATING OIL OF REGULATORS AND TRANSFORMERS*

Lucas Silva Toledo <sup>1</sup>  
Marcos Rosa dos Santos <sup>2</sup>  
Valdomiro Vega Garcia <sup>3</sup>

**Resumo** – Os reguladores de tensão, autotransformadores monofásicos usados para ajustar os níveis de tensão na rede elétrica primária, realizam a regulação por meio de chaves internas imersas em óleo isolante, controladas por relés. Durante a comutação de carga, pequenos arcos elétricos podem danificar os contatos internos e alterar as propriedades físico-químicas do óleo, reduzindo a vida útil do equipamento. O estudo visa monitorar e diagnosticar gases dissolvidos no óleo desses reguladores por meio da análise de gases dissolvidos (DGA), coletando amostras e comparando os valores com normas estabelecidas, assegurando a confiabilidade do sistema. Utilizando o método de Monte Carlo, faz-se a previsão de eventos incertos, o que possibilita ações de manutenção preventiva mais eficazes. A partir desta análise, foi possível perceber um sobreaquecimento no regulador de tensão por meio das relações químicas no óleo, evitando desligamentos não programados e a deterioração completa do óleo, promovendo ações que contribuem para a sustentabilidade e preservação ambiental.

**Palavras-chave:** Regulador de tensão. Óleo isolante. Gases dissolvidos. Método de Monte Carlo.

**Abstract** – Voltage regulators, single-phase autotransformers used to adjust voltage levels in the primary power grid, perform regulation through internal switches immersed in insulating oil, controlled by relays. During load switching, small electrical arcs can damage the internal contacts and alter the physicochemical properties of the oil, reducing the equipment's lifespan. The study aims to monitor and diagnose dissolved gases in the oil of these regulators using Dissolved Gas Analysis (DGA), collecting samples and comparing the values with established standards to ensure system reliability. By applying the Monte Carlo method, the prediction of uncertain events is made, enabling more effective preventive maintenance actions. From this analysis, it was possible to detect overheating in the voltage regulator

<sup>1</sup>Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema Elétrico de Potência (Mackenzie/Higienópolis-SP); Técnico de Distribuição na EDP SP. Contato: lucas.stoledo@hotmail.com.

<sup>2</sup>Pós-Doutorado em Sistemas de Potência (USP); Especialista em Transmissão e Distribuição de Energia; Coordenador no curso de Engenharia Elétrica (UNIP); Docente na Escola de Engenharia (IPM). Contato: marcos.rosa@mackenzie.br.

<sup>3</sup>Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica (UFABC); Pesquisador Doutor (ITAEE); Especialista Cientista de Dados na área de Operação e Manutenção (ENEL). Contato: valdomirovega@hotmail.com.

*through chemical changes in the oil, preventing unplanned shutdowns and complete deterioration of the oil, while promoting actions that contribute to sustainability and environmental preservation.*

**Keywords:** *Voltage regulator. Insulating oil. Dissolved gases. Monte Carlo method.*

## I. INTRODUÇÃO

Os reguladores de tensão instalados na rede de distribuição são autotransformadores monofásicos, responsáveis por elevar ou abaixar níveis de tensão de redes primárias de energia. Segundo Costa e Melo (2019, p. 7):

“[...] o princípio de funcionamento do regulador é similar à de um autotransformador, com acoplamento magnético entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário seguido de um acoplamento elétrico, ou seja, o autotransformador pode ser abaixador, elevador, e regulador de tensão.”

Estes equipamentos são utilizados em alimentadores extensos, em que se faz necessário elevar a tensão por conta de perdas técnicas ocorridas em função do comprimento do circuito. A aplicação do regulador de tensão monofásico em redes de distribuição de energia elétrica foi abordada por Costa e Melo (2019, p. 4). Os níveis de tensão à jusante do regulador são controlados por relés dedicados e os valores são obtidos através de alteração no tap da bobina interna do equipamento. Os mecanismos de comutação operam imersos em óleo isolante, mas mesmo nesta condição, ocorrem pequenos arcos elétricos que deterioram contatos elétricos, bem como as propriedades do óleo isolante.

Os reguladores de tensão são instalados nos trechos principais dos alimentadores (AL) aéreos primários, conhecidos como tronco. O tronco do AL é o trecho em que o circuito possui os condutores com a maior bitola, os demais trechos são conhecidos como ramais. Segundo Gama, Monteiro, Borges e Fortes (2022, p. 4), “Esse dispositivo é cada vez mais desafiado pelas redes de distribuição com altos níveis de fontes renováveis oriundos das GDs.”. Devido à esta configuração, quando ocorrem falhas ou problemas operacionais nos reguladores de tensão, grande parte dos consumidores conectados à jusante do equipamento sofrem severas variações de tensão, ou até a interrupção no fornecimento de energia.

Portanto, com o objetivo de se preservar a operação do sistema de distribuição, ou mesmo de se manter reguladores em condições operacionais positivas, pode-se aplicar o método de análise e diagnóstico de óleo isolante chamado Dissolved Gas Analysis (DGA). Este método pode ser realizado através de amostras do óleo isolante,

possibilitando a constatação de concentrações de gases-chave, gases estes que podem ser prejudiciais ao funcionamento do equipamento.

Ainda neste sentido DE SOUZA (2023, p. 19) afirma que:

“A análise de amostras de óleo através da cromatografia permite a identificação dos níveis de cada gás, incluindo metano, etano, etileno, óxidos de carbono e acetileno. Essa identificação permite avaliar a condição do isolamento composto pelo conjunto papel/óleo mineral isolante e identificar possíveis falhas em andamento.”

Estes métodos são responsáveis por identificar sobrecarga, vazamentos do isolante, índice dielétrico do óleo, ocorrências de curto-circuito interno no passante e estimativa da vida útil do equipamento.

Monitoramentos de mesma natureza são utilizadas nas Subestação de Energia (SE) de alta tensão. A resolução ANEEL (2015) estabelece requisitos mínimos de manutenção para equipamentos da rede básica, incluindo cromatografia de transformadores (TRs), com uma frequência máxima de 6 meses e uma tolerância mínima de 1 mês. Embora os TRs sejam equipamentos altamente confiáveis e com baixas taxas de falhas, são mínimos os desligamentos provocados por gases, porém com altas consequências. Explosões e incêndios podem resultar em fatalidades, danos catastróficos à propriedade e interrupção do serviço, acarretando custos significativos para o dono do ativo.

Contudo, os reguladores de tensão ficam em constante exposição às intempéries, com riscos frequentes de deterioração e desgastes prematuros, assim como outros equipamentos instalados na rede de distribuição, por exemplo banco de capacitores e estações transformadoras de distribuição. Devido a isso, faz-se necessário uma análise periódica da qualidade do óleo isolante dos reguladores de tensão por meio de coletas de óleo, visando aumentar a confiabilidade e qualidade do sistema, além da implantação de planos de manutenção mais precisos, evitando-se assim desligamentos não programados e a deterioração total do óleo isolante, favorecendo ações que impactam na sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

## II. METODOLOGIA

A partir destas condições, foram adotadas normas que tratam das condições físico-químicas de óleos isolantes de transformadores e auxiliam na interpretação dos resultados oriundos de análises realizados em gases dissolvidos, bem como possibilitam

associar e entender a relação dos gases com os tipos de falhas características, sendo elas a NBR 7070, NBR 7274, IEC 60599.

Os valores típicos obtidos da norma IEC 60599 observados na figura 1 do repositório do Github, cujo link do repositório está disponível nas referências deste trabalho, são reconhecidos mundialmente pelas instituições: Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) e Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRE), pois foram validados dados de mais de 20.000 equipamentos amostrados. Seus valores típicos dependem de diversos fatores como idade do equipamento, tipo, fabricante, clima e regime de operação. Por isso os valores dos gases dissolvidos no óleo dos equipamentos podem variar de região para região e o modo de operação na qual o equipamento foi submetido.

Além dos valores típicos fornecidos pela norma, calcula-se a curva característica para a rede de equipamentos elétricos em estudo, a fim de melhorar a precisão e identificação prévia de falhas.

Para este trabalho, foram coletados dados de três transformadores, todos de 88:13,8 kV. As amostras do óleo isolante foram realizadas semestralmente.

- Primeiro e segundo TR, ambos da mesma SE:

- Potência: 15 MVA
- Fabricação: 1978.
- Capacidade do tanque: 20.250 L de óleo isolante.

- Terceiro TR:

- Potência: 60 MVA
- Fabricação: 1982.
- Capacidade do tanque: 39.018 L de óleo isolante.

A partir das tabelas 1 e 2, localizadas no repositório do GitHub, confeccionam-se as curvas características dos gases dissolvidos, comparando-as com os valores típicos da norma IEC 60599.

Verifica-se na figura 1, cujo link do repositório está disponível nas referências deste trabalho, que os gases dissolvidos nos transformadores em estudo estão abaixo do nível estabelecido pela IEC 60599. Porém, para o TR1, existem gases que estão acima da média dos outros equipamentos e acima do limite da norma. Para estes casos, é recomendada a coleta periódica do óleo e um acompanhamento aprimorado deste dispositivo para evitar um desligamento não programado e manutenções corretivas.

Logo, o aumento expressivo de certos gases pode indicar falhas no equipamento. Pode-se interpretar os dados obtidos nas tabelas e relacionar o tipo de falha com os gases dissolvidos, segundo a NBR 7274:2012.

Diante disso, analisando os gases dissolvidos no TR1 que teve seu nível de Etano ( $C_2H_6$ ) acima da média, e analisando também o total de gases combustíveis (TGC) que foi de 452 ppm classificado como nível médio, obtém-se os seguintes resultados com base nas tabelas 3 e 4 inseridas no Github, cujo link está disponível nas referências deste trabalho:

Tabela 1 – Relação dos gases do TR1 pelo método de Rogers

TR1		
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
NS	5,58	0,03
NS	4,86	0,05
NS	5,50	0,03
NS	4,43	0,02
NS	3,50	0,03

Fonte: Autores, 2024.

Não foi possível calcular a primeira coluna, pois o valor esperado de acetileno estava abaixo do limite de detecção do método utilizado. Analisando a tabela, percebe-se um valor alto da relação  $\frac{CH_4}{H_2}$  caracterizando um sobreaquecimento e descargas parciais (DP), devido à relação  $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$  resultar em um número menor que 0,2.

Outras relações muito importantes para a identificação de defeitos envolvendo o papel isolante do tipo kraft comum e o contato do ar atmosférico com o óleo isolante são as relações de dióxido de carbono com monóxido de carbono e de oxigênio com nitrogênio. Essas relações identificam a degradação do papel isolante presente no núcleo do transformador e defeitos térmicos envolvendo o isolamento sólido.

Tabela 2 – Relação da degradação do papel isolante

TR1			
$\frac{CO_2}{CO}$	Valor esperado	$\frac{O_2}{N_2}$	Valor esperado
10,21	3 - 11	0,06	>0,3
7,85	3 - 11	0,12	>0,3
22,27	3 - 11	0,07	>0,3
18,47	3 - 11	0,03	>0,3
18,08	3 - 11	0,19	>0,3

Fonte: Adaptado de NBR 7274 (2012, p. 14)

Conforme os dados mostrados na tabela acima, a relação maior que 11 de monóxido de carbono indica uma evolução de defeito envolvendo o isolamento térmico.

A temperatura do isolamento sólido é o principal fator de envelhecimento do transformador. Esse isolamento, com a temperatura e o tempo, entra em um processo de despolimerização, provocando a degradação das propriedades mecânicas do papel, tais como a elasticidade e a resistência aos esforços de tração. Com isso, o papel se fragiliza, tornando-se quebradiço, não suportando os esforços de curto-circuito e as próprias vibrações do funcionamento do transformador, caracterizando o fim da vida útil do transformador.

Já na segunda relação, obtém-se um número inferior a 0,3 o que caracteriza um excessivo consumo de oxigênio. Portanto tem-se uma taxa maior de oxidação do óleo e conseqüentemente o envelhecimento acelerado do papel isolante.

Em vista disso, pode-se analisar os resultados obtidos do TR1 pelo método Triângulo de Duval. Conforme ANTUNES (2020, p. 47), O Método do Triângulo de Duval utiliza três gases correspondentes ao aumento do conteúdo de energia ou temperatura de falhas: metano ( $CH_4$ ) para falhas de baixa energia/temperatura, etileno ( $C_2H_4$ ) para falhas de alta temperatura e acetileno ( $C_2H_2$ ) para falhas de temperatura/energia/arco muito alta. Em cada lado do triângulo são plotadas as porcentagens relativas desses três gases:

$$P1 = 100 \times \frac{g1}{g1+g2+g3} \quad (1)$$

$$P2 = 100 \times \frac{g2}{g1+g2+g3} \quad (2)$$

$$P3 = 100 \times \frac{g3}{g1+g2+g3} \quad (3)$$

Em que:

P1 = Porcentagem de  $CH_4$

P2 = Porcentagem de  $C_2H_4$

P3 = Porcentagem de  $C_2H_2$

$g1 = CH_4$  em ppm

$g_2 = C_2H_4$  em ppm  
 $g_3 = C_2H_2$  em ppm

Após o cálculo da porcentagem de cada gás na tabela 5 do Github. Obtém-se, por meio do software MATLAB, o triângulo de Duval, conforme a figura 2 (Github).

Por fim, após a análise dos gases, é possível utilizar a técnica de Simulação de Monte Carlo (SMC) para ajudar na tomada de decisão. Segundo CAMPANHOLA. (2023, p. 29):

"O Método de Monte Carlo (MMC) é uma ferramenta muito relevante para a solução de problemas que envolvem um elevado grau de incertezas, necessitando de um tratamento probabilístico para levar a um resultado adequado."

Ao modelar a incerteza através de distribuições de probabilidade e repetidas execuções, é possível obter uma visão clara dos possíveis resultados e suas probabilidades, tornando o processo de tomada de decisão mais robusto e confiável.

A Simulação de Monte Carlo cria um modelo de resultados possíveis utilizando distribuições de probabilidade, como a distribuição uniforme ou normal, para variáveis com incerteza inerente. O processo envolve recalculando os resultados repetidamente, cada vez usando um conjunto diferente de números aleatórios dentro dos valores mínimo e máximo. Esse exercício é repetido milhares de vezes em um teste típico, gerando muitos resultados prováveis. Para este projeto foram feitas 500 simulações com o intervalo de confiança de 95%. Conforme MENDES, Vênus L. S.; SILVA, Armando M. L.; COSTA, João G. C. (2021, p. 3), "O algoritmo cronológico gera um grande número de repetições ou simulações (Nsim) do período de análise, baseado nas distribuições de probabilidade dos tempos envolvidos [...]".

A SMC é criada a partir da geração de números aleatórios no Excel utilizando o desvio padrão pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

Em que:

$\sigma$  = Desvio médio padrão

$x$  = Valor da amostra

$\bar{x}$  = Valor médio da amostra

$n$  = Número de amostras

Contudo, conhecendo as técnicas do método de Monte Carlo, é possível estimar a tendência da proporção de aumento dos gases dissolvidos no óleo, conforme a figura 3 (Github).

### III. RESULTADOS

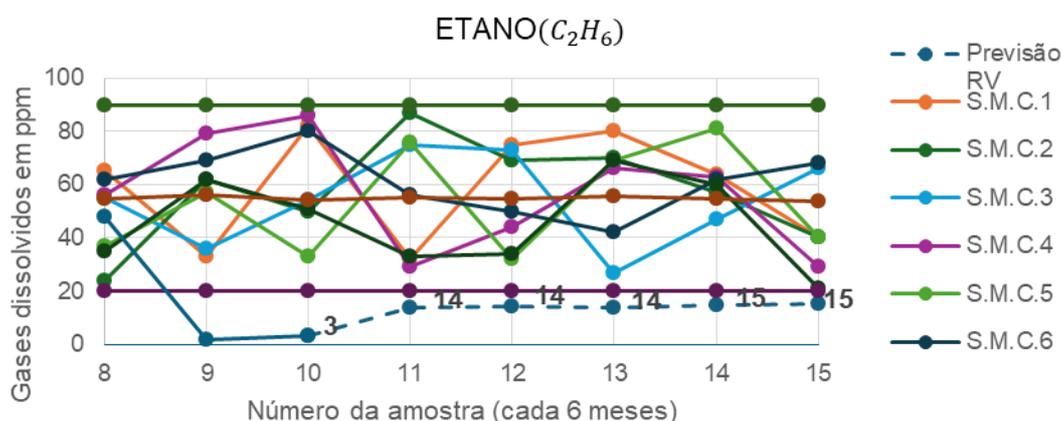
A partir da metodologia citada acima, iniciou-se a pesquisa de campo para coleta do óleo isolante de reguladores de tensão para análise cromatográfica. Foram coletadas diferentes amostras no período de 6 meses de intervalo para efetuar o diagnóstico dos gases dissolvidos no regulador, conforme ilustra a figura 4 do Github.

Após a extração, os líquidos foram enviados para o laboratório especializado em análise cromatográfica para a elaboração do teste. Com isso, obtém-se os dados em ppm da tabela 6 do Github.

Com os dados dos gases dissolvidos é possível analisar se há a presença de descargas parciais e a degradação do papel isolante utilizando o método de Rogers na tabela 9 do Github e o método do Triângulo de Duval na figura 5 (Github).

Aplicando o método de Monte Carlo obtém-se a figura 1 deste documento e a figura 6 (Github):

Figura 1 - Previsão do nível de Etano ( $C_2H_6$ ) do regulador pelo método Monte Carlo



Fonte: Autores, 2024.

### IV. CONCLUSÃO

Este artigo indica que os estudos de DE SOUZA (2023, p. 34) mostraram ter correlação com os resultados laboratoriais. Ressalta-se a importância de interpretar esses resultados junto com outras informações, como o histórico operacional do transformador, normas vigentes e os métodos citados neste artigo, para uma avaliação mais precisa da vida útil do equipamento.

Por meio desta análise, foi possível perceber um sobreaquecimento T3 no regulador de tensão por meio da relação do Etileno ( $C_2H_4$ ) e Etano ( $C_2H_6$ ), que gerou um número maior que quatro na tabela 7 (Github). No entanto, a relação se normalizou

nas próximas amostras. Todavia, é necessária uma nova coleta do óleo no intervalo de um mês para o acompanhamento das condições do equipamento, visto que os gases Nitrogênio ( $N_2$ ), Oxigênio ( $O_2$ ) e Hidrogênio ( $H_2$ ) estão com uma taxa de aumento de gás em ppm/ano elevada, maior que o estipulado por norma.

A ferramenta de simulação de Monte Carlo mostrou ser essencial na análise de dados e amostragem aleatória para resolver problemas de tomada de decisão com múltiplas incertezas. Com ela, foi possível modelar o comportamento do sistema, prever estados futuros dos gases dissolvidos no óleo isolante, gerando diversos cenários diferentes com a geração de números aleatórios e o cálculo do desvio padrão, oferecendo assim uma base sólida para a determinação da ação a ser tomada.

Porém, para melhor exatidão e qualidade dos dados, é necessária uma variedade de dados de entrada. Por se tratar de um equipamento que não possui nenhum histórico de análise cromatográfica, as distribuições de probabilidades foram baseadas em três amostras do óleo, afetando assim a capacidade de prever com precisão eventos futuros e comprometendo o planejamento estratégico.

Por fim, evidencia-se a importância da análise cromatográfica do óleo isolante do regulador de tensão monofásico de distribuição e o uso da simulação de Monte Carlo para a análise e gestão de sistemas complexos com incertezas. Assim como no estudo de CAMPANHOLA. (2023, p. 29), é possível realizar uma comparação entre as condições atuais dos equipamentos, obtidas pelo ranking estático, e os cenários futuros que envolvem incertezas e eventos aleatórios, o que proporciona uma visão mais abrangente sobre o comportamento dos sistemas. A capacidade de fornecer uma compreensão profunda dos riscos, melhorar a precisão das previsões e apoiar decisões informadas faz do método de Monte Carlo um recurso valioso em diversas situações. A flexibilidade e a ampla aplicabilidade garantem que continue sendo uma técnica relevante e poderosa para diagnosticar os gases isolantes em reguladores e transformadores, promovendo uma operação segura e evitando danos às pessoas e aos equipamentos.

## V. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7274**: Amostragem de gases e óleo mineral isolante de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos: elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7070**: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço: elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60599**: Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. 3rd ed. Geneva: IEC, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Resolução Normativa n.º 669**, de 3 de novembro de 2015. Estabelece os procedimentos de manutenção para equipamentos da rede básica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 nov. 2015.

ANTUNES, Harison A; **Metodologia de Acompanhamento e Identificação de Falha em Transformadores (MAIFT): contribuição da identificação da causa raiz aliada à manutenção preditiva**. 2020. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2020.

CAMPANHOLA, Filipe Possatti. **Ferramenta de apoio à gestão de ativos para sistema de potência empregando os métodos ahp e monte carlo aplicada a transformadores de potência**. 2023. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2023.

GAMA, Leandro P.; MONTEIRO, Paulo R. D.; BORGES, Thiago T.; FORTES, Marcio Z.; **Análise dos reguladores de tensão em redes com alta penetração de geração distribuída fotovoltaica: uma perspectiva do consumidor industrial**, Rio de Janeiro, abr. 2022. Revista de Tecnologia Aplicada (RTA). Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:180259662>. Acesso em: 19 mar. 2024.

COSTA, Leonardo. L.; MELO, Kayck. H. P.; **Regulador de tensão monofásico aplicação em redes de distribuição de energia elétrica**. 2019. Dissertação (Bacharel em Engenharia Elétrica) - faculdades FINOM e Tecsoma, Minas Gerais, 2019.

DE SOUZA, Marcino. A. L.; **Comparação entre os métodos dga online e laboratorial para avaliação do estado de óleos minerais em transformadores de potência**. 2023. Dissertação (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2023.

MATHWORKS. **Duval Triangle**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31317-duval-triangle>. Acesso em: 20 maio. 2024.

MENDES, Vênus L. S.; SILVA, Armando M. L.; COSTA, João G. C.; **Simulação Monte Carlo Cronológica para Dimensionamento de Transformadores Reservas em Subestações de Distribuição**, Rio de Janeiro, fev. 2021. Sociedade Brasileira de Automática (SBA). Disponível em: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2336>. Acesso em: 17 abr. 2024.

TOLEDO, Lucas S. Repositório Github. Disponível em: [https://github.com/TCCII-Lucas/Diagnostico\\_Gases\\_Isolantes](https://github.com/TCCII-Lucas/Diagnostico_Gases_Isolantes). Acesso em: julho de 2024.

## VI. AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão a Deus por ter me acompanhado em cada etapa deste trabalho, dando-me coragem e paciência para enfrentar os desafios e perseverar em minha jornada acadêmica. Aos orientadores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso. Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado, e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.