



# ANÁLISE NUMÉRIA DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR INTERIOR DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Vinicius Soares Medeiros, [viniciussoaresjn@hotmail.com](mailto:viniciussoaresjn@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Arthur Heleno Pontes Antunes, [arthur.antunes@ufu.br](mailto:arthur.antunes@ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia – MG.

**Resumo.** Este estudo propõe realizar simulações computacionais de um sistema de condicionamento de ar capaz de atender a uma subestação de transformação de energia elétrica modular. As análises térmicas foram realizadas no software computacional ANSYS pelo pacote de ferramentas Fluent, que possibilita através do método de elementos finitos, a simulação de problemas termo-fluidos simultânea simulação eletromagnética da subestação. A concepção da ideia dessa subestação surgiu recentemente e seu pedido de patente já se encontra regularizado junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), no entanto existe a necessidade de se estudar, especificamente, a melhor forma possível de arrefecer tal subestação modular, buscando um sistema térmico capaz manter as condições mínimas de segurança para o funcionamento de um transformador de energia elétrica no interior de um invólucro subterrâneo, além de assegurar condições ambientais adequadas para o funcionamento dos demais equipamentos da subestação.

**Palavras chave:** Subestação de energia. Sistema de arrefecimento. Simulação numérica.

## 1. INTRODUÇÃO

As subestações de transformação de energia comumente enfrentam problemas com a insuficiência de suas estanqueidades, o que gera elevados custos na construção e manutenção dos equipamentos da subestação, pois esta fica vulnerável às interferências externas, como animais ou inundações que podem prejudicar o funcionamento do sistema. No entanto, quando um projeto de subestação passa a considerar a importância da estanqueidade, estudos complementares e análises termo-fluidicas do ar no interior da subestação se tornam necessários.

Alguns esforços científicos recentes estão sendo direcionados para o melhoramento de outros fatores que envolvem as subestações subterrâneas. Loo and Ukil (2017) desenvolveram um projeto estrutural de uma subestação aterrada resistente a fatores externos. Este modelo dimensiona uma subestação para resistir a terremotos, porém o trabalho não é isolado nem hermético e não tem nível profundo de automação. Em um estudo de caso no Alaska, Miranda et al. (2017) desenvolveram um projeto de subestação subterrânea sujeita a intempéries de tempo. Observa-se o problema de falta de aquecimento do ar interior da subestação o que pode comprometer o seu funcionamento. Neste trabalho o problema térmico está em volta do resfriamento do ar no interior da subestação.

Nair et al. (2016) estudaram algumas proposições de medidas de segurança e operação em subestações subterrâneas. No entanto, seus projetos não preveem isolamento hermético e seu sistema de monitoramento se restringe a variáveis elétricas. Por outro lado, Shkrabets and Ostapchuk (2013) abordaram um novo modelo de subestação subterrânea com monitoramento de parâmetros de operação. O estudo é voltado para aplicações em grandes minas, em que se utilizam equipamentos IP de grande classe. Os autores destacam a dificuldade de acesso e manutenção ainda bem considerável no seu modelo.

Nas análises térmicas da subestação, Dawood et al. (2027) estudaram um transformador trifásico de 1,25 MVA fazendo análise analítica e de elementos finitos em dimensões 2D e 3D. A reatância de dispersão, a densidade de fluxo magnético e a energia foram calculadas usando o programa ANSYS Maxwell e o método analítico. O protótipo de transformador estava construído sobre os resultados do FEM. Resultados analíticos e numéricos de diferentes parâmetros do transformador foram comparados também com resultados experimentais. Os resultados mostram que o FEM pode ser uma ótima ferramenta, com maior eficácia para cálculos de diferentes parâmetros de transformadores. A diferença entre os resultados experimentais e FEM não foi superior a 5 %.

Loucaides et al. (2010) avaliaram o comportamento térmico de uma subestação de distribuição para simular vários cenários de temperatura ambiente e de carga, bem como investigar o efeito de parâmetros de projeto, como tamanho da abertura e materiais de construção. O transformador da subestação é de 1000 kVA com perdas de aproximadamente 10 kW. A partir deste trabalho é possível avaliar as condições ideais de ar para os equipamentos que compõem uma subestação desta capacidade (1000 kVA) a 40 °C.

O objetivo principal deste trabalho consiste na simulação, por meio de técnicas de elementos finitos, da operação de um sistema de condicionamento de ar capaz de arrefecer o ar interior de uma subestação subterrânea de transformação de energia elétrica, hermética, pressurizada, automatizada e isolada, de um projeto P&D que tenta otimizar os problemas recorrentes das subestações subterrâneas. Com estas premissas, serão realizadas modelagens e implementações computacionais com os principais componentes da subestação, com objetivo de desenvolver um sistema de condicionamento térmico que garanta o funcionamento harmônico de equipamentos que trabalham com níveis extremamente diferentes de dissipação térmica.

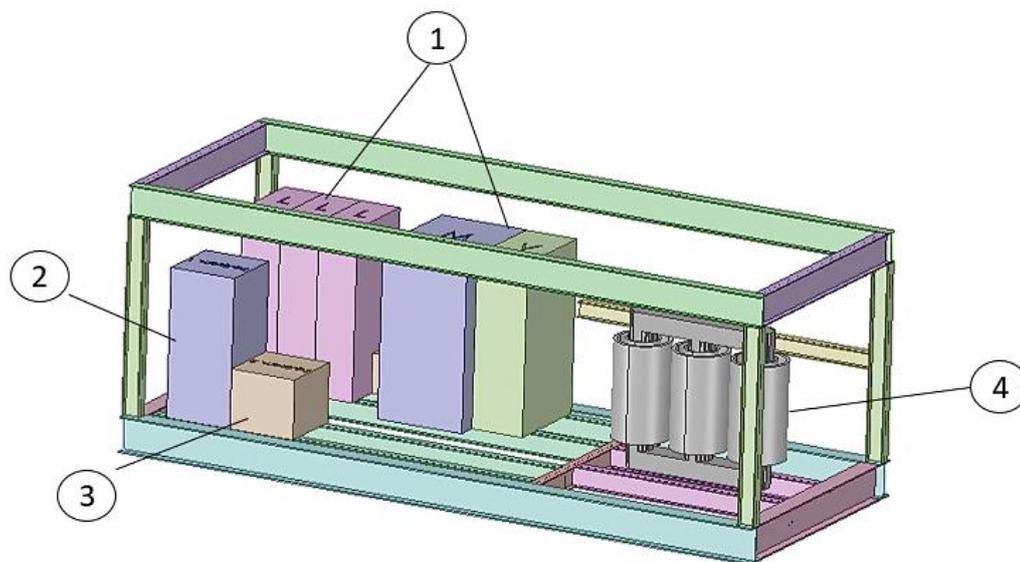
## 2. METODOLOGIA

A simulação computacional de problemas térmicos é uma ferramenta indispensável para a modelagem dos trocadores de calor, de forma a garantir que atendam as especificações. Modelos computacionais dos trocadores de calor auxiliam na definição do posicionamento ideal dos componentes no interior da subestação. Esta configuração está relacionada com as características de funcionamento de cada componente e como cada um sofre influência em sua efetividade devido a dissipação térmica do transformador de energia.

Neste caso, o sistema de arrefecimento precisa realizar uma taxa de troca de calor suficiente para manter volume de ar interno na condição de temperatura de bulbo seco e umidade relativa própria para o funcionamento de todos os componentes. O software utilizado para simulações térmicas da subestação é o ANSYS®, por meio da sua ferramenta Fluent.

O tema em questão refere-se à execução de uma ideia de um novo conceito de subestação de transformação de energia. A Figura 1 apresenta a ilustração estrutural do invólucro da subestação estudada e seus componentes. Trata-se de uma estrutura auto suportável em aço galvanizado, compondo um conjunto de chaves seccionadoras (1), um transformador auxiliar (2), uma caixa de baterias (3) e um transformador a seco (4).

Figura 1. Modelo estrutural do invólucro da subestação e seus componentes internos.

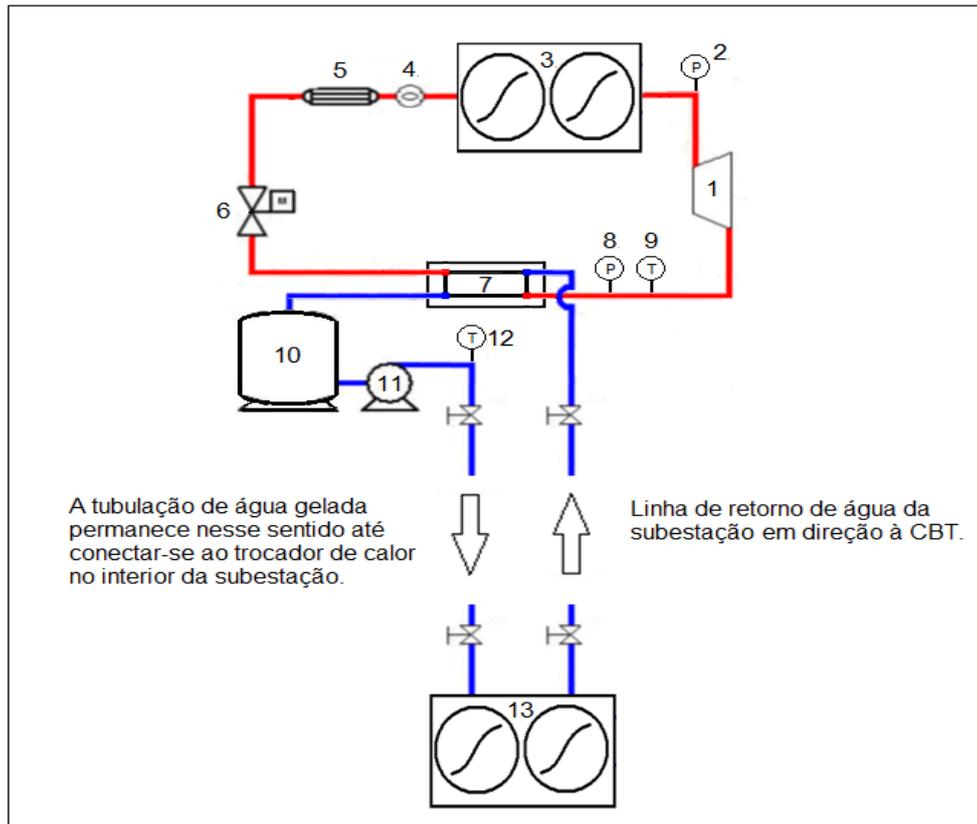


O Sistema de Arrefecimento escolhido é denominado na literatura como Resfriador de Líquido (Chiller). O arrefecimento do ar interior da subestação será feito por meio de um trocador de calor hidrônico do tipo fan coil ou fancolete, no qual a água gelada irá entrar a aproximadamente (5 a 10°C) e sairá a uma temperatura mais elevada, com uma vazão mássica de aproximadamente 1 kg/s. Dessa forma o sistema é capaz de arrefecer os 16kW de energia dissipada pelo transformador e pelos componentes elétricos.

Este sistema de arrefecimento proposto deve assegurar algumas premissas básicas para garantir o funcionamento da subestação: O primeiro é a robustez, neste caso a solução escolhida para retornar robustez ao sistema de arrefecimento seria utilizar um sistema de refrigeração por compressão de vapor de expansão direta associado a um circuito de fluido secundário e posteriormente, resfriar o ar interior da subestação. Uma segunda premissa é a flexibilidade, para que o sistema opere com cargas térmicas variáveis, ou seja, ser flexível com relação à sua capacidade de refrigeração, pois o transformador pode operar tanto em carga nominal, como em carga reduzida, mesmo tendo esta premissa as simulações serão realizadas considerando o funcionamento máximo do transformador. Por fim, é necessário se considerar a durabilidade dos sistemas, onde ainda há necessidade de fácil instalação, manutenção e operação.

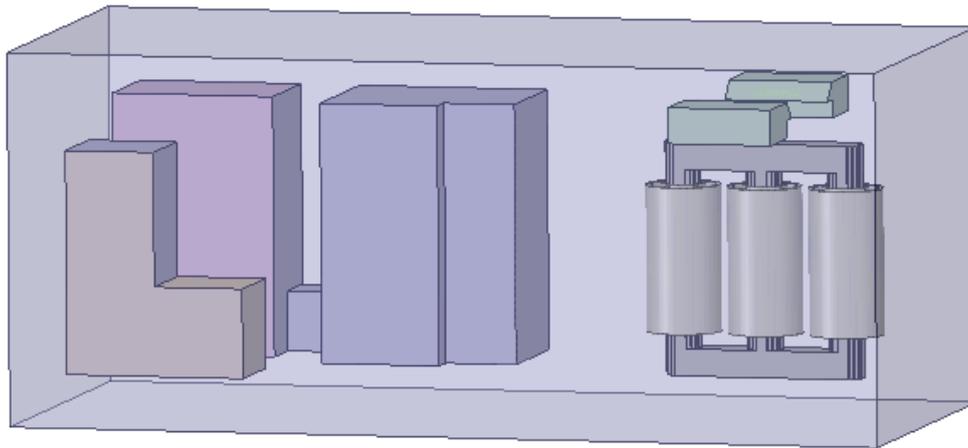
A Figura 2 apresenta os equipamentos e acessórios que constituem o sistema de refrigeração. A linha vermelha representa o sistema de refrigeração de expansão direta. O refrigerante flui dentro dos tubos de cobre (itens 1 a 9), onde: (1) é o compressor de refrigeração; (2) sensor de pressão; (3) condensador a ar; (4) visor de líquido; (5) filtro secador; (6) válvula de expansão eletrônica, VEE; (7) trocador de calor de placas; (8) sensor de pressão; e (9) sensor de temperatura. A linha azul representa o circuito de fluido secundário, ou água fria, esta é composta de tubos de aço inoxidável ou cobre (itens 10 a 13), onde: (10) é o reservatório isolado termicamente de água gelada; (11) bomba centrífuga para água gelada; (12) sensor de temperatura e (13) trocador de calor hidrônico, fan coil.

Figura 2. Diagrama esquemático do sistema de arrefecimento para a subestação de energia.



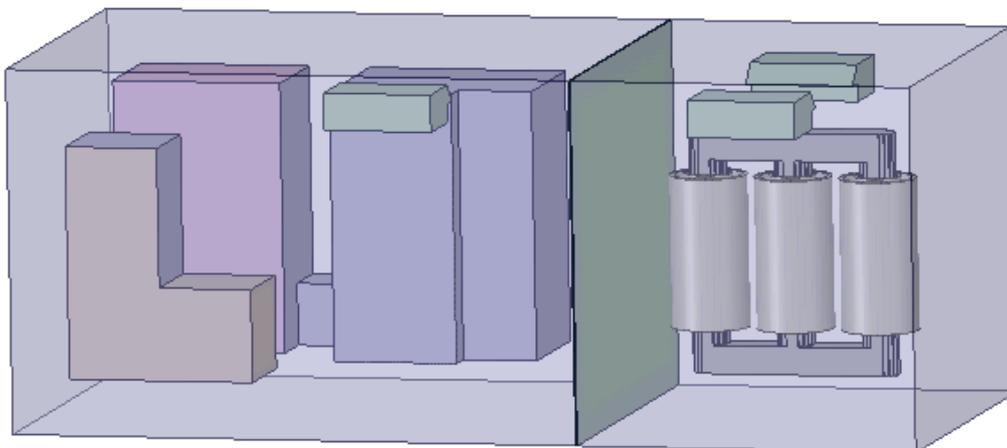
As simulações pelo método de elementos finitos foram então realizadas a fim de se verificar a eficácia do sistema de arrefecimento escolhido, diante das condições de operação da subestação. Na simulação foi considerado um trabalho ótimo do transformador a seco, onde a bobina central do transformador está a uma temperatura de 125 °C. Para a troca de calor da água gelada do Fan coil com o ar interno foi considerada uma velocidade de 1.5 ms<sup>-1</sup> em uma temperatura de 10 °C. Nas paredes da subestação, que estão em contato com o solo, foram consideradas condições adiabáticas. Nos demais componentes, não foram consideradas dissipações térmicas, uma vez que a dissipação do transformador é muito superior. A Figura 3 apresenta o modelo simplificado utilizado para a simulação, contendo as unidades evaporadoras do sistema de arrefecimento.

Figura 3. Modelo simplificado da subestação com as unidades evaporadoras.



Por fim, as simulações foram direcionadas a tentativa de otimização do sistema de arrefecimento, neste sentido foi inserida uma chapa de metal de 10 mm no interior da subestação com o intuito de conter a dissipação térmica do transformador para os demais componentes e uma nova unidade evaporadora para assegurar o controle de temperaturas na região da caixa de baterias, Figura 4.

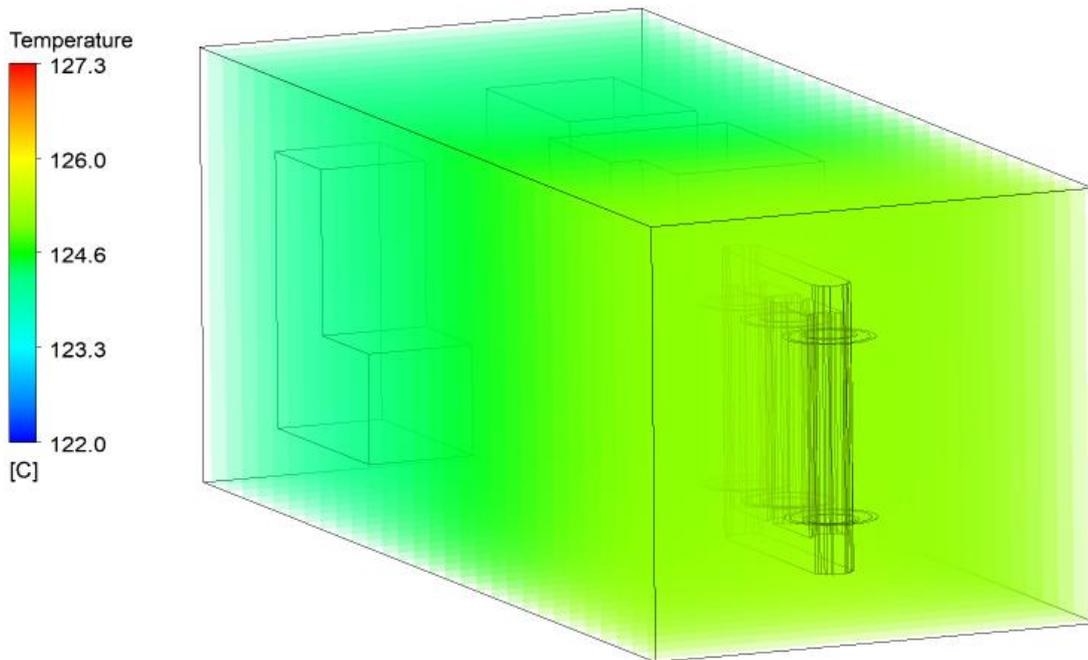
Figura 4. Modelo simplificado da subestação com a chapa de metal.



### 3. RESULTADOS

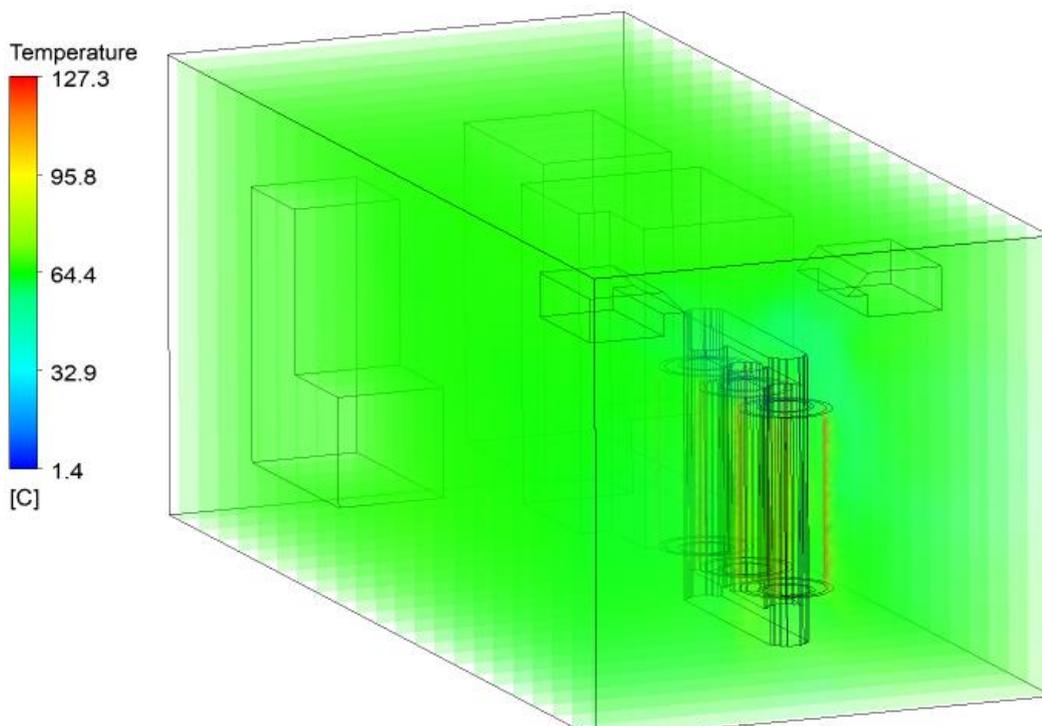
A utilização do Fluent possibilita a realização das simulações do ar interior da subestação em diversos cenários. A Figura 5 mostra o perfil térmico do ar dentro do invólucro em um cenário em que não há um sistema de arrefecimento, neste caso as temperaturas se mantêm aproximadamente constante em 125 °C.

Figura 5. Perfil térmico do ar interior da subestação, cenário sem sistema de arrefecimento.



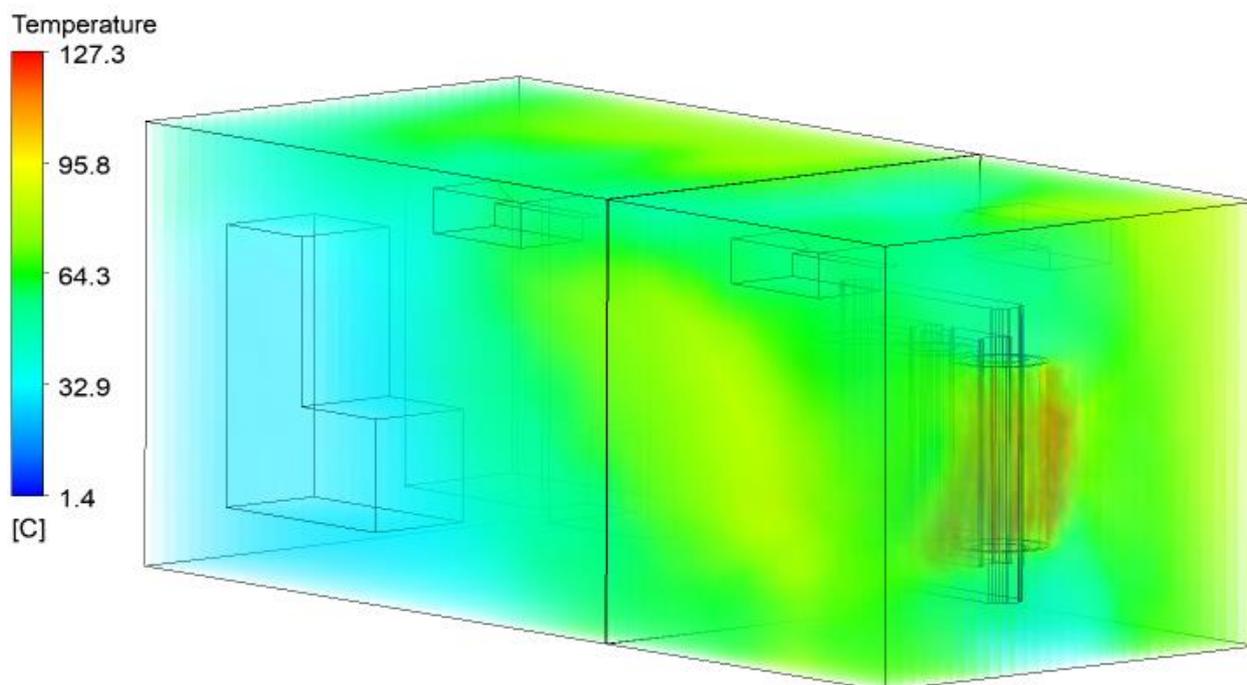
A Figura 6 mostra o perfil térmico do ar dentro do invólucro em um cenário com a presença das unidades evaporadoras nas condições que foram descritas acima velocidade de insuflamento do ar de  $1.5 \text{ ms}^{-1}$  e temperatura de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , nesta situação as unidades evaporadoras são capazes de arrefecer o ar na região oposta ao transformador de energia em uma média de  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , considerando um funcionamento máximo do transformador onde a dissipação térmica acarreta um temperatura de  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  em sua superfície. A maior preocupação neste caso, é com a casa de baterias, que exige um maior cuidado quando trabalha em temperaturas elevadas, justificando assim a necessidade de realizar simulações com as condições máximas de operação do transformador, assegurando um maior controle dos limites da temperatura no ambiente interno.

Figura 6. Perfil térmico do ar interior da subestação, cenário com sistema de arrefecimento.



A Figura 7 mostra o perfil térmico do ar dentro da subestação em um cenário em que além da existência de um sistema de arrefecimento é acrescentada uma chapa de metal de 10 mm de espessura na tentativa de auxiliar no controle do fluxo de calor quente do transformador de energia. Essa é uma situação que comumente é utilizada nas subestações, sendo que neste caso foi acrescentada uma outra unidade evaporadora sobre a casa de baterias. Nesta condição verificou-se uma redução qualitativa na temperatura do ar na região das chaves seccionadoras de da casa de bateria, em torno de 40 °C que se apresenta como uma condição mais adequada para o bom funcionamento dos equipamentos e sem alterações na durabilidade dos mesmos.

Figura 7. Perfil térmico do ar interior da subestação, cenário com uma chapa metálica.



### 3. CONCLUSÕES

A modelagem computacional e a implementação dos principais componentes da subestação foram realizadas visando elencar as interferências térmicas dentro do invólucro. Esses estudos foram necessários para avaliar os possíveis impactos causados por componentes elétricos (transformador, disjuntor, interruptor elétrico, etc.), o que permite a construção da subestação de forma mais otimizada e com maior confiabilidade e segurança de operação. As primeiras simulações resultaram em um perfil de temperatura homogêneo em todo o volume da subestação. Nessa situação, observou-se que as unidades não foram capazes de fornecer efeito de resfriamento suficiente.

O perfil de temperatura heterogênea do gabinete interno foi obtido após um processo do transformador foram capazes de efetivamente resfriar o ar com valores de temperatura na faixa de 60 a 100 °C. O principal efeito da otimização pôde ser observado na extremidade esquerda do recinto onde estavam localizados os componentes mais sensíveis, nesta região crítica os valores de temperatura permaneceram próximos ao desejado.

### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de deixar os seus agradecimentos para a Associação Brasileira de Ciência e Engenharia Mecânica – ABCM e para o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade Federal de Uberlândia, TCE Engenharia e CEB (Companhia de Energia de Brasília)

### 5. REFERÊNCIAS

- Dawood, K., Cinar, M.A., Alboyaci, B. and Sonmez, O., 2017. “Modelling and analysis of transformer using numerical and analytical methods”. In 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts IEEE. p. 01-02.
- Loo, K.H. and Ukil, A., 2017. “Design of safety critical substation earthing system based on soil characteristics”. In 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, pp. 1–8.
- Loucaides, N., Ioannides, Y., Efthymiou, V. and Georghiou, G.E., 2010. “Thermal modeling of power substations using the finite element method”.
- Miranda, L., Mueller-Stoffels, M. and Whitney, E., 2017. “An alaska case study: Electrical transmission”. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 6, p. 061702.
- Nair, B., Pillai, R., Adkar, V., Chitnis, C.K., Havaladar, F. and Kundargi, S., 2016. “Underground substations: reliable, safe and invisible power solution”. *Water and Energy International*, Vol. 59, No. 3, p. 24–28.
- Shkrabets, F. and Ostapchuk, A., 2013. “Application of 35 kilovolt voltage for underground power consumers supply systems of deep power-intensive mines.” *Scientific Bulletin of National Mining University*, No. 1

## **6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.