



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Vernei Gialluca	Vivaldo S. Junior	Marcelo F. Garrido
Genera Conceito e Inovação	Unicamp - Universidade Estadual de Campinas	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.
vernei@generatech.com.br	vivaldo@fea.unicamp.br	marcelo.furlan@aes.com

Desenvolvimento de Sistema para Utilização de Calor Gerado por Transformadores como Fonte Alternativa de Energia para Aquecimento de Água

Palavras-chave

Bomba de Calor
Transformador
dissipação de calor
Água quente

Resumo

O presente trabalho teve como foco a avaliação do potencial térmico que é oriundo do processo de transformação de tensão em transformadores elétricos, objetivando utilizar uma estratégia de recuperação desse calor gerado. O protótipo dimensionado e construído para a avaliação recupera o calor dos transformadores, por meio de uma bomba de calor, e o armazena em água quente, a qual pode ser utilizada para diversos usos domésticos. Existe uma aplicabilidade múltipla no projeto desenvolvido, que é a melhora na capacidade de transformação concomitante à geração de água quente pelo uso de alternativo de energia que seria perdida. Os ensaios realizados mostraram que o sistema conserva aquecido a aproximadamente 45 °C um tanque de 5000 litros de água, enquanto mantém a temperatura média do ar da cabine de transformação abaixo de 36 °C.

1. Introdução

Uma vez que é intrínseca as perdas de calor pela transformação da tensão elétrica, é necessária a devida dissipação de calor para que não haja a sua acumulação, elevando a temperatura de operação ou do óleo (meio de transferência de calor). Esse calor dissipado pode ser aproveitado em diversas aplicações de aquecimento, racionalizando o uso da energia de tal forma a gerar economia. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial térmico gerado pelos transformadores de potência subterrâneos com possibilidade de conversão para seu aproveitamento, frente a prospecção de consumo de água quente em

estabelecimentos comerciais. Para tal avaliação, foi desenvolvido e instalado um sistema de acondicionamento de ar em uma cabine de transformação, com vistas a bombear o calor gerado pelos transformadores para uma aplicação de água quente. Para atingir tal objetivo, a temperatura do ambiente interno e da superfície dos transformadores de uma cabine de transformação selecionada foi monitorada. Um sistema de acondicionamento do ar com aquecimento de água foi instalado, monitorando-se as condições com o sistema em funcionamento, para efeito comparativo. O sistema instalado mostrou que a energia gerada pelos transformadores foi eficientemente transferida para o aquecimento da água, mostrando que há uma aplicabilidade múltipla, de tal forma a melhorar a capacidade de transformação concomitante à geração de água quente para consumo doméstico. O projeto de P&D aprovado pela ANEEL é de código PD-0390-0004/2009, intitulado de “Desenvolvimento de sistema para utilização de calor gerado por transformadores subterrâneos como fonte alternativa de energia para aquecimento de água”, cujas as entidades executoras foram a Genera Conceito & Inovação e o Núcleo Interdisciplinas de Planejamento Energético da Universidade Estadual de Campinas, com suporte financeiro ao projeto pela empresa de energia elétrica, Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A..

2. Desenvolvimento

1. Fundamentação teórica

1.1. Geração de Calor em Transformadores

As perdas ocorridas em transformadores de potência, transformação de energia em calor, definem a eficiência dos transformadores e seus rendimentos. Elas se apresentam principalmente no núcleo e nos enrolamentos e são expressas em watts. As perdas provocam o aquecimento das diversas partes do equipamento: núcleo, enrolamentos e óleo, quando a parte ativa (núcleo e enrolamentos) está imersa em óleo. As principais perdas em transformação são: perdas a vazio, perdas com carga e a soma dessas duas últimas, que são as perdas totais. Normalmente as perdas em transformadores são fornecidas pelos fabricantes, determinadas através dos ensaios a vazio e de curto circuito. Estas são fornecidas também nas fichas de ensaio de transformadores. A empresa EFACEC é uma respeitosa fabricante de transformadores e reserva em sua página na internet uma série de informações sobre perdas em transformadores. A Tabela 1 foi compilada com dados fornecidos pelos catálogos da empresa e mostra a contribuição das perdas de transformação para diferentes transformadores com potências selecionadas. Em geral, as perdas de transformação giram em torno de 1 a 2 % da potência instalada do equipamento. Há uma queda acentuada da capacidade do transformadores em suportar descargas elétricas acentuadas quando a temperatura do ponto mais quente do enrolamento atinge 200 °C, que é o valor referenciado pelo EPRI (Electric Research Institute) [2]. Além disso, sua capacidade de transformação diminui com o aumento da temperatura, pois a quantidade de calor dissipada aumenta.

Tabela 1. Perdas em transformadores trifásicos fabricados pela empresa EFACEF (Tensão primária de 24 kV, tensão secundária de 0,42 kV).

Potência (kVA)	Perdas totais (W)	Perdas totais (%) ($\cos \phi = 1$)
160	2.810	1,76
250	3.900	1,56
400	5.530	1,38
500	6.600	1,32
800	9.750	1,22
1000	12.000	1,20

1.2. Sistemas de Bombeamento de Calor

Em transformadores de porte considerável, recorre-se ao uso de um óleo para resfriamento dos enrolamentos. Este óleo, por sua vez, deve ser isolante elétrico. Em geral emprega-se óleo do tipo mineral

[3]. Em relação ao resfriamento, a temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) não deve ser superior a 40 °C, e a temperatura média, em qualquer período de 24 horas não deve ser superior a 30 °C [4]. Caso o ambiente não favoreça uma troca eficiente de calor, a temperatura do isolamento e do óleo elevar-se-ão a níveis de degradação. Assim, transformadores instalados em ambientes favoráveis, com temperaturas adequadas, terão maior capacidade de suportar a elevados fatores de carga sem afetar as características dos seus materiais isolantes, como o papel isolante que separa as bobinas e o óleo, o que implica em redução de sua vida útil.

Apesar de pouco aplicadas no Brasil as bombas de calor são equipamentos eficientes para a geração de energia térmica na forma de "calor", podendo gerar de 3 a 5 vezes a quantia de energia empregada no acionamento do compressor. As bombas de calor são muito aplicadas em sistemas de aquecimento de água, tais como piscinas, sistemas de água quente de indústrias, hotéis e academias, entre outros. A bomba de calor, ou bomba térmica, é um sistema que por meio de um ciclo termodinâmico, troca calor de uma fonte à baixa temperatura e torna essa energia disponível a uma temperatura mais alta. Em geral, emprega-se um sistema de compressão de vapor para uma bomba de calor, porém há outras formas de se conseguir transportar o calor, como por exemplo, sistemas de absorção, dessorção ou mesmo solar. Uma bomba de calor pode ser vista como um sistema de refrigeração em que a aplicação maior não é a parte fria e sim a quente. Devido a essa especificidade, seus rendimentos são relativamente altos. A Figura 1 ilustra um desenho esquemático de uma bomba de calor por sistema de compressão de vapor. O fluido refrigerante, confinado no sistema, passa por diversas transformações termodinâmicas ao longo do ciclo. O ciclo é iniciado com o refrigerante líquido sendo admitido na válvula de expansão, sofrendo uma queda brusca de pressão, com conseqüente queda em sua temperatura. Nesse ponto, o fluido passa por um evaporador, e retira calor do ambiente a ser condicionado. Após o compressor eleva a pressão e a temperatura do refrigerante, descarregando-o no condensador, que está próximo da aplicação quente desejada. O refrigerante, então, transmite todo o calor e se condensa, retornando ao ciclo.

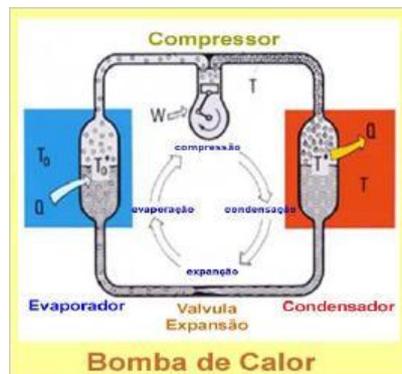


Figura 1. Desenho esquemático de uma bomba de calor

Um sistema de bomba de calor pode ser utilizado em diversas aplicações para aquecimento de água, qualquer que seja a fonte quente. No presente estudo, deseja-se utilizar o calor de transformação como a fonte quente para o protótipo de bomba de calor a ser estudado, produzindo água quente e melhorando o ambiente da cabine de transformação.

2. Desenvolvimento da Pesquisa

A pesquisa desenvolvida neste projeto considerou as seguintes etapas:

2.1. Conformação do cenário do estudo

Durante esta etapa foi pesquisada uma cabine de transformadores que poderia ser utilizada como bancada experimental para os ensaios propostos. Essa cabine deveria apresentar características de alta temperatura a partir do calor dissipado pelos transformadores e pouca ventilação durante o seu funcionamento diário. Características típicas de ambientes subterrâneos, ou seja, dos Sistemas Reticulados e os Minis Reticulados utilizados pela AES Eletropaulo. Esses fatores ambientais encontrados em muitas instalações promovem alterações no funcionamento dos componentes elétricos e perda de eficiência dos transformadores.

Inicialmente, foi considerada uma instalação subterrânea localizada no centro da cidade de São Paulo, por sugestão da concessionária de energia elétrica Eletropaulo. Porém, uma verificação preliminar das instalações e da pouca factibilidade para a montagem experimental descartaram a sua utilização. Outra cabine foi avaliada no subsolo da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Campinas. Embora essa instalação tivesse uma área maior e apresentava mais fácil acesso, foi rejeitada também, pois a cabine atingia apenas 36 °C durante os horários de grande demanda. Assim, considerando os critérios e as limitações anteriormente expostas, foi finalmente selecionada a cabine de transformadores do Gastrocentro do Hospital das Clínicas da Unicamp. Essa cabine encontra-se próxima a um prédio de escritórios, cozinha e vestiários do próprio Gastrocentro. Em termos da logística da instalação e pelo fato da cabine contar com três transformadores, este ambiente tornou-se o mais indicado para instalar o sistema. A cabine selecionada tem uma área de 150 m² e conta com três transformadores seguindo a distribuição apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Transformadores encontrados na cabine estudada

Transformador	Potência	Distribuição
N°1	75 kVA	Máquina de raios-X do gastrocentro
N°2	500 kVA	Hemocentro 2, ar condicionado hemocentro 1 e 2, gastrocentro 1, Nefro, caixa de água da triagem e Prodecad
N°3	500 kVA	Gastrocentro 2, Hemocentro 1, Gerador

Durante os horários de maior demanda, a temperatura interna na cabine chega a picos de 45 °C a 50 °C, conforme medição prévia, sendo que a ventilação dentro do ambiente é obtida por convecção natural de ar pelas janelas e entradas de ar da cabine. Em maio deste ano foi feita uma parada para manutenção e o transformador N°1 foi trocado por um de maior potência por necessidade interna do local. Esta cabine assim, assemelha-se fortemente às condições encontradas num ambiente subterrâneo.

2.2. Instrumentação do sistema.

Uma vez definido o cenário de estudo, a seguinte etapa buscou desenvolver um sistema de monitoração de temperatura que possa ser colocado dentro da cabine de forma confiável e sem interferências do entorno. Para este objetivo, foi utilizada na instrumentação do sistema uma maleta com transmissores de temperatura e de umidade relativa especialmente construída para poder servir como uma estação móvel de coleta e monitoração de dados. Todos os sensores utilizados foram conectados a um sistema de aquisição de dados constituído por três *Field Loggers* e um conversor de dados modelo USB-i485, sendo ambos da marca Novus. O sistema foi energizado por uma fonte de alimentação chaveada da marca HITECNOLOGIA modelo UPS 1094. A maleta com o conjunto de aquisição de dados pode ser visto na Figura 2. O *Field Logger* é um equipamento de aquisição e registro de variáveis analógicas, que opera como um registrador eletrônico de dados, armazenando as informações adquiridas em sua memória interna para posterior análise. Cada *Field Logger* contém oito canais de entrada de sinal analógico. O tipo de sinal a ser medido pelos canais é programável, individualmente para cada canal, durante o processo de configuração pelo software *Field Chart Novus*, que acompanha o equipamento. Durante a configuração foram definidos quais os canais seriam utilizados para medições em campo. Os canais utilizados para a monitoração da cabine e o tipo de medição realizada em cada um estão descritos na Tabela 3.

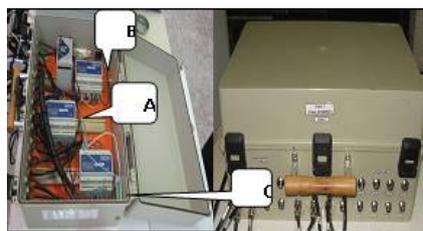


Figura 2. Sistema de aquisição de dados móvel: (A) *Field Logger*; (B) Fonte de alimentação; (C) conversor USB.

Tabela 3. Localização dos sensores no cenário de estudo

Grandeza	Tipo de Sensor	Localização
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°1
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°1
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°2
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°2
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°3
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°3
Temperatura	Termopar T	Área interna da cabine
Umidade relativa	RHT-WM	Área interna da cabine

Esse sistema de monitoração foi utilizado antes e depois da instalação do sistema. Uma monitoração das condições de temperatura e umidade relativa na cabine, assim como dos transformadores, foi efetuada ao longo de 30 dias para se ter um banco de dados, a partir do qual foi dimensionado o sistema de acondicionamento do ar e aquecimento de água (bomba de calor) necessário para a aplicação.

2.3. Sensores de temperatura e umidade relativa.

As temperaturas das superfícies dos transformadores foram obtidas por contato direto de sensores de temperatura com a carcaça. Os locais, onde houve o contato do sensor com o metal, foram isolados termicamente do meio ambiente, considerando-se aproximadas as temperaturas do centro e da superfície do sistema. Os sensores de temperatura utilizados foram termopares tipo T, que permitem leituras de temperatura de até 250 °C. Para monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente interno, foram instalados, em diversos pontos da cabine, transmissores de umidade relativa da marca Novus, modelo RHT-WM. Esses sensores permitem leituras de umidade relativa de 0 a 100 % e leituras de temperatura de bulbo seco de 0 a 100 °C.

2.4 Analisador de grandezas elétricas

Com o intuito de acompanhar o desempenho dos transformadores elétricos, em virtude de uma melhor dissipação de calor dentro da cabine, foram instalados dois analisadores de energia elétrica da marca Embrasul[®], modelo RE4000[®]. Este dispositivo é um analisador portátil, dotado de um display LCD e um teclado, que permitem a programação das funções e a parametrização do equipamento em campo. As grandezas monitoradas e coletadas, nas três fases foram: tensão (V), intensidade de corrente (A), potência (W), e frequência (Hz). O analisador foi ligado em série na alimentação dos transformadores N°2 e N°3, utilizando um conjunto de cabos para alimentação do sinal de medição. A comunicação do equipamento foi feita por uma porta *ethernet* com protocolo TCP-IP. A análise do histórico de dados foi feita através do software de análise ANL6000[®], para posteriormente ser exportado e salvo em formato de planilha.

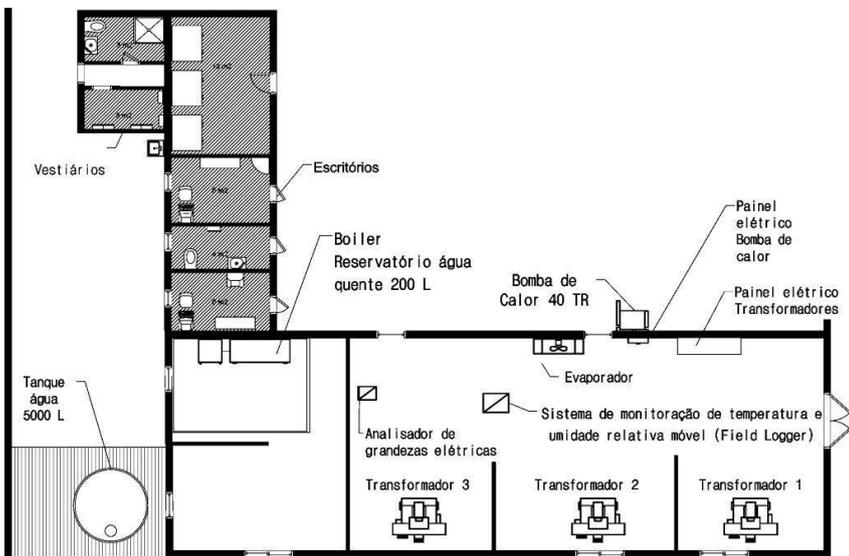
2.5 Dimensionamento do sistema de acondicionamento do ar e aquecimento de água (bomba de calor)

Neste trabalho foi possível aproveitar uma fonte de energia térmica que usualmente é rejeitada, que é o calor dissipado por transformadores elétricos. Através de uma estratégia tecnológica, esse calor foi utilizado para aquecer um reservatório de água de 5000 litros, para posterior estocagem e distribuição visando à utilização doméstica. É importante mencionar que, ao transportar o calor a partir do ambiente quente ao reservatório de água, também é conseguido um efeito de resfriamento no local, neste caso, a cabine. Esse fenômeno promove, assim, uma melhor condição de funcionamento desses equipamentos. Nesse contexto, a utilização de uma bomba de calor se ajusta perfeitamente ao cenário de estudo, já que é possível aproveitar ambos os lados do ciclo de refrigeração, tanto numa aplicação de aquecimento quanto de resfriamento. Na presente aplicação, o ar da cabine, aquecido a temperaturas superiores a 45°C pela dissipação de calor dos

transformadores, é a fonte quente, que efetua a troca de calor com a água proveniente de um tanque, que é o sumidouro ou reservatório frio. O fluido que intermedeia essa troca de calor é o refrigerante do ciclo de refrigeração. A potência do equipamento foi dimensionada considerando uma temperatura da cabine de 40°C, uma temperatura de evaporação do refrigerante de 10°C e uma temperatura de condensação de 50°C. A partir de cálculos, foi selecionada uma bomba de calor THS de 40 TR, a fim de elevar a temperatura da água até 60°C. Nesse cálculo, assumiu-se que a temperatura da água no reservatório oscila entre 20 e 40°C. Embora num primeiro momento a temperatura da água possa ser menor, existe um efeito acumulativo da temperatura durante o funcionamento contínuo da bomba de calor. A instalação da bomba de calor e os demais elementos no cenário de estudo acompanharam a distribuição dos ambientes do prédio do Gastrocentro, conforme pode ser visto na Figura 3. A bomba de calor utilizada foi do tipo split, com a unidade evaporadora localizada internamente à cabine de transformadores e a unidade condensadora anexa ao compressor, externamente. O evaporador foi fixado na parte superior da parede defronte aos transformadores, aproximadamente na posição intermediária da sala, de tal forma a atingir um bom direcionamento da flecha de ar, com consequente distribuição homogênea de ar resfriado pela cabine. O reservatório depositado na área lateral da cabine foi dimensionado para uma capacidade de 5000 litros e seu isolamento térmico foi confeccionado em espuma de poliuretano, a fim de evitar maiores perdas de calor. Um reservatório tipo boiler de 200 litros foi montado no teto do prédio, a partir da água quente armazenada, foi distribuída para as diversas aplicações. Após a instalação da bomba de calor, foram implantados os sistemas de monitoração de temperatura, umidade relativa e energia elétrica dentro da cabine.

2.6 Montagem da bomba de calor

A instalação hidráulica do sistema foi dividida em duas áreas, conforme a localização dos equipamentos, e em três partes para atender a necessidade de cada equipamento. Assim, para a linha de alimentação e retorno da bomba de calor, foi utilizada tubulação de PVC Aquatherm de 1" (13) e (14). Para a linha de alimentação e retorno do boiler, foi utilizada tubulação de PVC Aquatherm de ½" (15) e (16) e para a alimentação do tanque reservatório foi utilizada tubulação de ¾" (17). O bombeamento de água da linha de alimentação da bomba de calor (2) é feito por uma bomba hidráulica de ¼ HP (19). Ao fluir pelo condensador, o refrigerante entrega o calor removido da cabine para a água, que é proveniente do tanque reservatório (1). Em sequência, a água retorna ao tanque reservatório, onde é conservada a uma temperatura cada vez maior, devido ao efeito acumulativo. No painel elétrico da bomba de calor (12), foram instalados dois controladores digitais de temperatura, o primeiro ligado ao evaporador dentro da cabine e o segundo conectado à bomba de calor. Ambos os controladores utilizam um sensor de temperatura do tipo J e sua faixa de medição é de -50 a 600°C. Há, também, um temporizador programável. Se a temperatura na entrada da bomba for superior a 50 °C, o sistema de refrigeração passa a operar com condensação a ar. O boiler (4) é alimentado por uma linha (16) proveniente do tanque reservatório, e é esvaziado pela linha de alimentação da área de vestiários (21). O enchimento do boiler foi controlado por uma válvula de nível elétrica ligada à bomba hidráulica (20) de alimentação. A temperatura dentro do boiler foi programada para ser mantida em 50 °C, e o termostato do boiler foi ligado numa válvula solenoide normalmente fechada, que é acionada quando a temperatura decai, ocasionando a drenagem da água "fria" e obrigando, pela queda do nível, a renovação de água a alta temperatura proveniente do tanque reservatório. Já a alimentação do tanque reservatório foi controlada por uma válvula de nível mecânica do tipo boia. Um esquema deste conjunto experimental pode ser visto na Figura 4. Os sensores de temperatura foram fixados na carcaça dos transformadores e ligados no Fieldlogger Novus (9) dentro da cabine. Da mesma maneira, o analisador de energia elétrica RE4000 (8) foi colocado dentro da cabine e ligado eletricamente aos transformadores de 500 kVA (6) e (7). A temperatura e umidade relativa na cabine foram monitoradas por sensores colocados em diversos pontos da mesma (10) e (11). A vazão da água de alimentação da bomba de calor foi monitorada por um medidor magnético WMS-PRO-10412K (18). Todos os registros destes sensores foram coletados periodicamente na mesma cabine utilizando o software específico de cada equipamento. Com a montagem do sistema concluída, iniciou-se a monitoração e coleta de dados de temperatura, umidade relativa e grandezas elétricas.



CABINE DE TRANSFORMADORES GASTROCENTRO HOSPITAL DAS CLINICAS - UNICAMP

Figura 3. Elementos utilizados

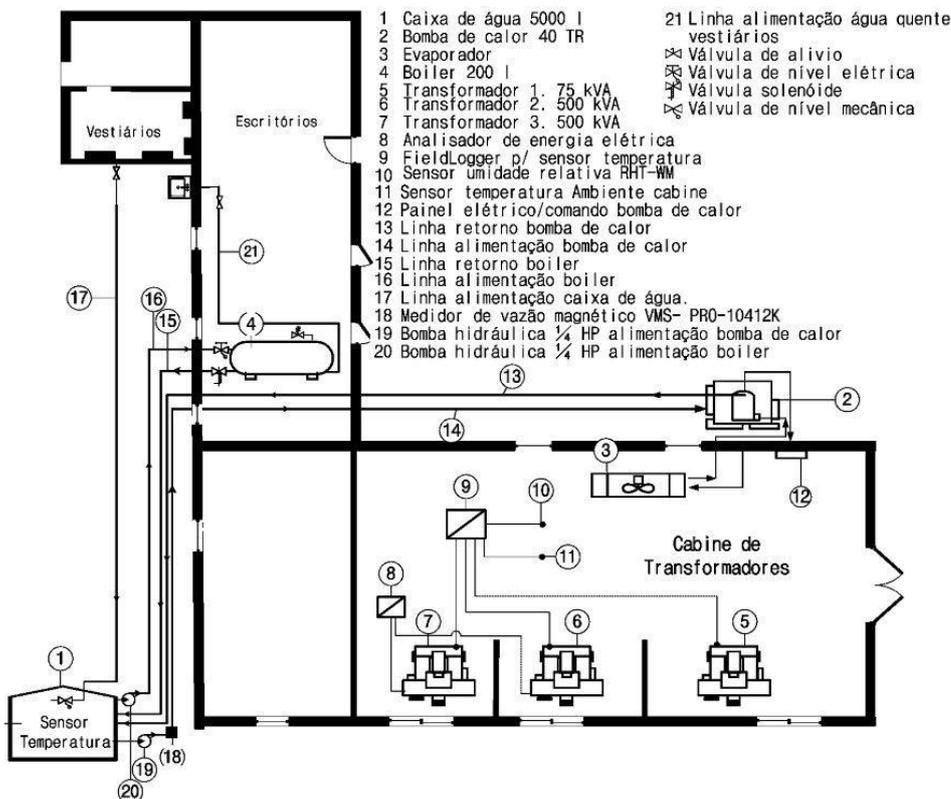


Figura 4. Esquema da instalação do sistema.

3. Resultados e Discussão

O trabalho de monitoração da cabine de transformadores do Hemocentro/Gastrocentro da Unicamp foi iniciado com a monitoração dos dados de temperatura e umidade relativa do ar da cabine, com sensores localizados em diversos pontos, assim como das temperaturas nas superfícies dos transformadores. Diversas coletas foram realizadas ao longo de um período de 3 meses para ter uma posição de como seria o perfil de temperatura sem a utilização de um sistema de refrigeração. O sistema de refrigeração implantado teve como principal função remover a energia térmica gerada pelos transformadores e enviá-la a um sistema de água, a fim de promover o aquecimento da massa de água. Em suma, o sistema aplicado é uma bomba de calor, pois retira calor de uma fonte quente e o transfere para uma outra aplicação, no caso, um sistema e água

quente. A temperatura interna da cabine depende de diversos fatores, tais como a temperatura do ar externo, a temperatura da superfície dos transformadores, bem como da atividade dos mesmos. Uma maior necessidade de carga dos transformadores implica numa maior geração de energia, o que provoca um aumento considerável da temperatura interna da cabine e uma diminuição, portanto, da capacidade de transformação do equipamento. Porém, quanto maior a energia gerada pelos transformadores, maior será a quantidade de calor que poderá ser bombeada para a água quente. Assim sendo, o trabalho de retirada de calor da cabine tem efeitos positivos múltiplos, pois pode melhorar a operação do transformador ao mesmo tempo que transfere a energia térmica para outra aplicação.

3.1. Cabine sem Sistema de Acondicionamento de Ambiente Instalado

Para melhor visualização do perfil de temperatura apresentado pela cabine e pela média da superfície do transformador, são mostrados a seguir os gráficos de acompanhamento da temperatura ao longo de diversos períodos. Na Figura 5 tem-se a variação da temperatura ao longo de um dia de coleta selecionado antes da instalação da bomba de calor (BC). A referida data foi um dia de sexta-feira.



Figura 5. Temperatura antes da BC

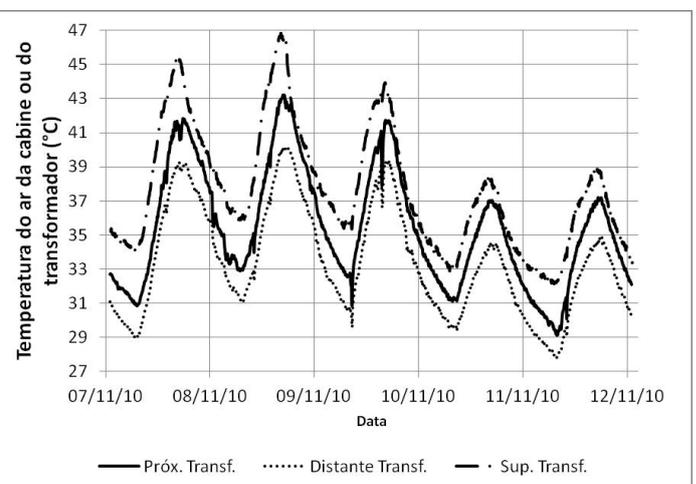


Figura 6. Temperatura segunda a sexta-feira antes da BC

O perfil do gráfico indica claramente que a temperatura interna da cabine de transformação não é constante e que um máximo de temperatura é atingido no período mais quente do dia, no qual também a atividade do transformador é mais alta. Durante a noite, a diminuição da temperatura interna da cabine é acompanhada pelo decréscimo da temperatura do ambiente externo, aliada a menor atividade do transformador. A temperatura da superfície do transformador acompanha o perfil mencionado. Esse ciclo é repetido diariamente, como mostrado na Figura 6 e, nos fins de semana, a temperatura média da cabine diminui, pois o requerimento do transformador é reduzido. Em geral, os pontos mais aquecidos encontram-se nas proximidades dos transformadores. Com os diversos dados coletados, calculou-se a média dos valores de temperatura ao longo da semana. Os valores encontram-se na Tabela 4, juntamente com os dados de temperatura média da superfície do transformador (pontuados no dissipador de calor).

Tabela 4. Valores médios de temperatura interna da cabine e da superfície dos transformadores, antes da instalação da bomba de calor.

Grandeza	Tipo de Sensor	Localização
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°1
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°1
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°2
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°2
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°3
Temperatura	Termopar T	Carcaça Trafo N°3
Temperatura	Termopar T	Área interna da cabine
Umidade relativa	RHT-WM	Área interna da cabine

Assim, durante a semana a cabine apresenta um temperatura média durante todo o período do dia de 34,1 °C para um intervalo de tempo semanal útil. A variação na temperatura da cabine é acompanhada pela temperatura na superfície dos transformadores, já que os dados são mais elevados quando a temperatura da cabine é maior. A temperatura da superfície dos transformadores está relacionada à temperatura do óleo de arrefecimento. Este óleo deve operar em uma faixa de temperatura ideal, a qual deve permitir que o arrefecimento das bobinas de transformação seja satisfatório. Devido ao sensor de temperatura instalado estar localizado superficialmente, a temperatura registrada pelo dispositivo não é o valor real de temperatura do óleo, devido às resistências à transferência de calor do óleo, do material do arrefecedor e do próprio contato do sensor com a superfície metálica. Este parâmetro é apenas indicativo do quão aquecido encontra-se o óleo. Em paralelo à monitoração da temperatura, a coleta de grandezas elétricas dos transformadores permite traçar um paralelo da influência da atividade do transformador na temperatura interna da cabine, mostrando que a atividade de transformação tem potencial de geração de energia. O perfil de potência total para um dia de coleta selecionado está mostrado na Figura 7. O perfil da potência total do transformador é mais chapado, já que ele é mais acionado durante o horário comercial. É, portanto, entre as 9 e as 15 horas que o transformador é mais exigido, mostrando a relação de proporcionalidade direta da temperatura da cabine com sua atividade, gerando calor por dissipação.

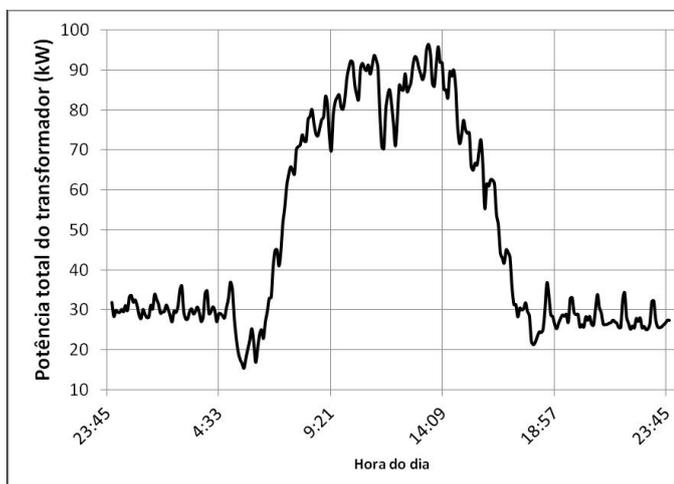


Figura 7. Potência antes da instalação da BC

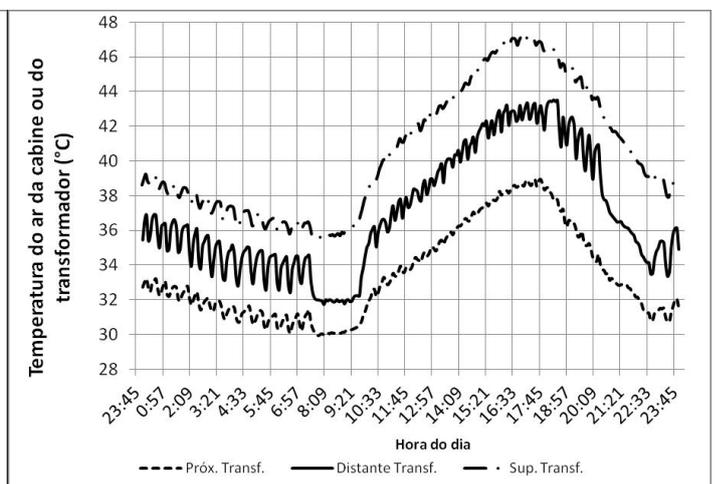


Figura 8. Temperatura após a instalação da BC

3.2. Cabine com Sistema de Acondicionamento de Ambiente Instalado

Após a instalação do sistema de refrigeração, o efeito esperado é uma diminuição da temperatura interna da cabine e dos transformadores, devido ao acúmulo da energia gerada pelos transformadores na água quente circulante. Assim sendo, o potencial de produção de água quente pela fonte de calor dos transformadores pode ser confirmado. Na Figura 8, tem-se o perfil da temperatura ambiente e da média de temperatura da

superfície do transformador para um dia de sexta-feira selecionado. Essa data foi escolhida para poder fazer um comparativo com o gráfico da Figura 5. Pode-se observar que a tendência de aumento da temperatura ao longo do dia ocorre em ambas as figuras mostradas. Um ponto interessante a ser levantado é que a temperatura do ar ambiente da cabine com o sistema de condicionamento de ar apresenta um perfil diferente do apresentado anteriormente. Os valores mais altos de temperatura encontram-se agora distantes do transformador e mais próximos do evaporador do sistema. Esse perfil ocorre pois o ar insuflado pelo evaporador vai em direção aos transformadores, logo, o ar nessa posição encontra-se mais frio. Ao passar pelos transformadores, o ar se aquece, retirando a energia da dissipação de calor dos transformadores. Devido à corrente de convecção formada, o ar retorna ao evaporador com maior temperatura, resfriando-se ao entrar em contato com o trocador de calor do evaporador e dando início a um novo ciclo. Como em meados de maio de 2011 houve uma troca de um dos transformadores da cabine devido a necessidades internas para um equipamento de maior porte, o calor gerado por esse novo equipamento é mais elevado. Assim sendo, se a cabine estivesse operando sem o sistema de condicionamento de ar, a sua temperatura interna deveria estar mais elevada, devido a maior potência dissipada. Não obstante, a temperatura média do ar ambiente da cabine teve uma pequena redução no comparativo diário de uma sexta-feira e no semanal, conforme os dados apresentados na Tabela 5. Nota-se, também, que a temperatura média da superfície dos transformadores aumentou, justamente por causa do equipamento ser de maior capacidade e, portanto, dissipar uma quantidade maior de energia.

Tabela 5. Valores médios de temperatura interna da cabine e da superfície dos transformadores, antes e após a instalação da bomba de calor.

Data		Temperatura média (°C)	
		Cabine	Transformador
Antes	Sexta	36,8	39,2
	Semana	34,1	36,3
Após	Sexta	35,2	40,5
	Semana	33,5	38,3

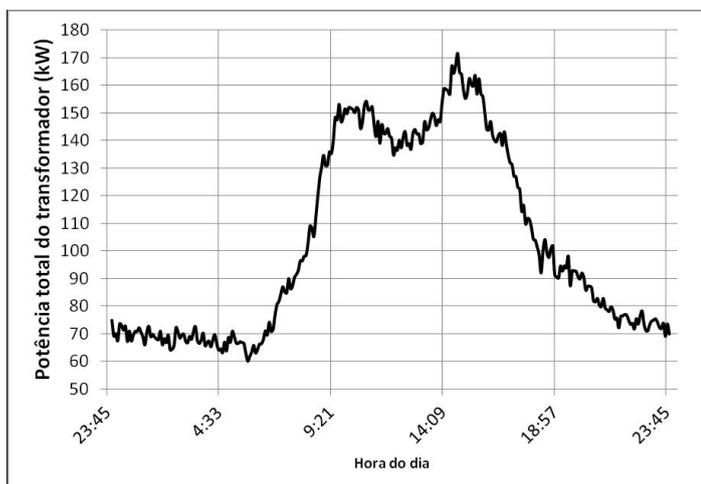


Figura 9. Potência após da instalação da BC

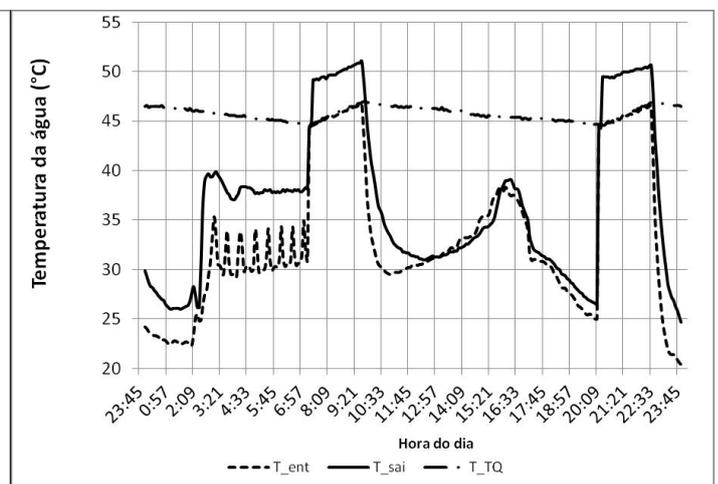


Figura 10. Temperatura água quente ao longo do dia.

Para mostrar que o transformador instalado é de maior capacidade, o perfil da potência total determinado para essa nova condição está exemplificado na Figura 9. É possível notar que o perfil de potência é similar ao apresentado na Figura 7, porém com valores mais altos. O sistema instalado pode operar tanto com condensação à água quanto a ar, sendo que na primeira opção ocorre a termoacumulação da energia retirada dos transformadores na água quente do tanque. Essa estratégia de operação faz-se necessária, pois a água do

tanque pode aquecer em demasia, devido a pouca utilização da água, por exemplo, fazendo com que o sistema de refrigeração opere em uma condição crítica. O desempenho da operação mencionada está apresentado pelo gráfico da Figura 10. A temperatura do tanque (T_{TQ}) permanece aproximadamente constante ao longo do dia, sendo aquecida nos momentos em que a bomba de água quente é acionada, pois a mesma recebe o calor do condensador do sistema de condicionamento de ar. No gráfico da Figura 10, nota-se dois momentos do dia selecionado em que a bomba é acionada. Essa percepção ocorre pela mudança brusca de temperatura da água, tanto na entrada da bomba (T_{ent}), quanto na saída (T_{sai}). A água que circula pelo condensado da bomba de calor se aquece e ao atingir o valor crítico de 45 °C na T_{sai} , o sistema passa a operar com condensação a ar, de forma a manter a cabine com uma temperatura adequada. Esse acionamento da bomba não constante ocorreu principalmente devido à baixa utilização, por parte dos usuários, da água quente produzida. A vazão média de água quente quando a bomba encontra-se em operação foi de 1,4 m³/h. As temperaturas médias de entrada e saída da água no sistema de condensação foi de 45,6 °C e 49,6 °C, respectivamente. Convertendo a vazão volumétrica para vazão mássica através da equação (1) e utilizando a equação da taxa de transferência de calor dada pela Equação (2), calculou-se a taxa de calor recebida pela água quente durante o período de bomba acionada.

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (1)$$

$$q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica de água (kg/s), ρ é a densidade da água na temperatura média (kg/m³), \dot{V} é a vazão volumétrica determinada pelo medidor de vazão (m³/h), q é a taxa de transferência de calor (W), c é o calor específico da água [J/(kg.°C)] e " ΔT " é a diferença de temperatura entre a saída e a entrada de água. A densidade da água utilizada para cálculos foi de 989 kg/m³ e o calor específico de 4180 J/(kg.°C) [5].

Assim:

$$\dot{m} = 989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 0,385 \text{ kg/s}$$

$$q = 0,385 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (49,6 - 45,6) ^\circ\text{C}$$

$$q = 6,43 \text{ kW}$$

Portanto, a taxa de energia que a água retira do sistema quando as bombas estão em operação é de 6,43 kW.

3. Conclusões

O bombeamento de calor do interior da cabine para o aquecimento de água foi uma aplicação energeticamente eficiente pois nunca houve uma proposição que recuperasse calor para alguma finalidade, eventualmente rentável. Tal protótipo tem ainda mais utilidade tratando-se de ambientes subterrâneos como nos sistemas reticulados e minis reticulados encontrados na AES Eletropaulo. Simultaneamente ao aquecimento de água, obteve-se o condicionamento do ambiente interno da cabine, provocando um resfriamento da superfície do transformador e indiretamente favorecendo a do óleo, o que possibilita maior vida útil e maior capacidade nos transformadores. A máquina térmica foi projetada para que tivesse uma operação de dissipação de calor, tanto para água quanto para ar, conforme alcançado o máximo de temperatura da água, devido a não renovação ou consumo. Sem nenhum custo energético, através do ar quente retirado do sistema de arrefecimento do transformador, uma grande quantidade de água foi aquecida e termoacumulada podendo ser utilizada em aplicações diversas para uso comercial ou não em hospitais,

clubes, academias, e até mesmo residencial. Não menos importante, o condicionamento interno da cabine favoreceu um ambiente de trabalho para funcionários de manutenção, não acarretando inconveniências de condições de insalubridades da Norma NR-15.

4. Referências bibliográficas

[1] EFACEC. “Catálogo Óleo CEI,” Disponível em:

<http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/CatalogoOnline/transformadores/Catalogo%20oleo%20CEI%20Mod%20TR%202008%20B%201007%20A1.pdf>

[2] A. A. C. de Freitas, I. N. da Silva, A. N. de Souza, “Aplicação de redes neurais na estimação da temperatura interna de transformadores de distribuição imersos em óleo,” *Sba Controle & Automação*, vol. 13 n.3, PP. 266-274, Set./dez. 2002.

[3] J. L. A. de Almeida, *Eletrotécnica Industrial*, 3ª Ed. São Paulo: Érica, 1987.

[4] BOMBACALOR HEAT-PUMP SYSTEMS. “Aproveite-se da Energia gratuita do meio ambiente,” Disponível em: <http://bombacalor.eu/pt/principio/index.htm>.

[5] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003, p. 608.
