



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUXILIAR DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO, PARA ARREFECIMENTO DE
TRANSFORMADORES DE FORÇA**

Por

Ismael Nickson Pinto de Araújo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre.*

ISMAEL NICKSON PINTO DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUXILIAR DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO, PARA ARREFECIMENTO DE
TRANSFORMADORES DE FORÇA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:

Termofluidos

Orientador:

Prof. Dr. José Maurício Alves Matos Gurgel

João Pessoa – Paraíba

fevereiro, 2016

A663d Araújo, Ismael Nickson Pinto de.

Desenvolvimento de sistema auxiliar de resfriamento evaporativo, para arrefecimento de transformadores de força / Ismael Nickson Pinto de Araújo.- João Pessoa, 2016.

69f. : il.

Orientador: José Maurício Alves Matos Gurgel
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Engenharia mecânica. 2. Termofluidos. 3. Transformador de potência. 4. Pulverização de água. 5. Resfriamento evaporativo.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUXILIAR DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO, PARA
ARREFECIMENTO DE TRANSFORMADORES
DE FORÇA**

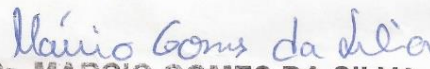
por

Ismael Nickson Pinto de Araújo

Dissertação aprovada em 26 de fevereiro de 2016


Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCO ALVES DE MATOS GURGEL
Orientador – UFPB


Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. MARCIO GOMES DA SILVA
Examinador Externo – IFPB

Aos meu pais e familiares por sempre acreditarem e apoiarem na minha escolha de vida, e por me darem forças para vencer todas as dificuldades.

A minha namorada pelo amor e carinho, por sua compreensão aos momentos de ausência e renúncia, por sempre está ao meu lado me ajudando e incentivando a atingir meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força e coragem para enfrentar mais uma batalha na minha vida.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, pela oportunidade de realizar o sonho de me tornar mestre em engenharia.

A todo o corpo docente do programa de pós-graduação, pelo esforço e dedicação em nos ensinar. Em especial ao meu professor orientador José Maurício, pela confiança depositada em mim.

A minha família, namorada e amigos, pelo apoio que foi me dado.

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUXILIAR DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO, PARA ARREFECIMENTO DE TRANSFORMADORES DE FORÇA

RESUMO

O consumo de energia elétrica no nosso convívio social como, casas, apartamentos, comércio, indústria, hospitais, é conseguido graças a um equipamento que torna os níveis de tensão e corrente elétrica em valores aceitáveis exigidos por norma, para que possamos usufruir da energia elétrica de maneira segura e eficiente, esses equipamentos são os transformadores de força ou de potência. Visto sua importância, técnicas que retardam ou evitem falhas nesse equipamento, visando a maior disponibilidade e com isso menos paradas para manutenção, são tema de estudo de diversos pesquisadores e centros de ensino. Uma falha bastante comum em transformadores de médio a grande porte que são utilizados na transmissão e distribuição de energia, é a degradação do papel isolante do núcleo do transformador, que é causada principalmente pelo gradiente adverso de temperatura que circula no núcleo através do óleo isolante. Logo o presente trabalho analisa a eficiência de um sistema auxiliar de arrefecimento do transformador, que visa dissipar o calor absorvido pelo óleo de maneira rápida e eficiente, diminuindo a degradação do papel isolante e aumentando sua vida útil. O sistema será composto por bicos pulverizadores de água, que serão instalados nos radiadores do transformador, em frente aos ventiladores, no mesmo sentido do fluxo de ar. A pulverização de água nesse fluxo de ar, irá causar uma diminuição da temperatura e um aumento de umidade, isso devido a um fenômeno conhecido como resfriamento evaporativo, onde as pequenas gotas de água recebem o calor do ar e se evaporam rapidamente. Será analisado a vazão de água na pulverização, a quantidade e o posicionamento dos bicos ao longo do radiador e o fluxo de ar dos ventiladores, para que o sistema tenha eficiência térmica e energética.

Será utilizado um sistema de controle composto por inversores de frequência, sensores de temperatura e placa de aquisição de dados, que serão monitorados pelo LabView.

Palavras-chave: Transformador de potência; Pulverização de água; Resfriamento Evaporativo.

AUXILIARY SYSTEM DEVELOPMENT OF EVAPORATIVE COOLING FOR COOLING TRANSFORMER FORCE

ABSTRACT

The consumption of electricity in our social environment such as in houses, apartments, business, industries, hospitals, it's achieved thanks to an equipment that makes the levels of tension and electric current acceptable as demanded by the standards, so we can benefit from electricity in a safe and efficient way, these equipment are the power transformers. Due your relevance, techniques that retard or avoid the failures in these equipment, aiming a better availability and a smaller number of maintenance stops, are the theme of several researchers and studies centers. A very common failure in medium and large transformers that are used in transmission and distribution of power, is the degradation of the insulating function of transformer's core that it is caused mainly by the adverse gradient of temperature that circulates in the core through the insulating oil. The present work analyzes the efficiency of a transformer's cooling auxiliary system, that aims dissipate the heat absorbed by the oil in a quick and efficient way, decreasing the degradation of the insulating function and increasing its lifespan. The system consist of water spray nozzles, that it will be installed in the transformer's radiator, in front of the fans, in the same direction of the air flow. The water spraying in the air flow, will cause a temperature decrease and a humidity increase, due to a phenomenon known as evaporative cooling, where heat from the air makes the small drops of water evaporate quickly. It will be analyzed the water flow rate in the spraying, the amount and placement of the water spray nozzles through the radiator and the air flow of the fans. So the system has thermal and energetic efficiency. Will be used a control system that includes a variable-frequency drive (VFD), temperature sensors and a data acquisition board (DAQ), all monitored through LabVIEW.

Keywords: Power transformer; Water spray; Evaporative cooling.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
CAPÍTULO 2	14
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 RESFRIAMENTO EVAPORATIVO.....	14
2.2 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	21
2.2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	26
2.2.3 TIPOS DE TRNSFORMADORES	27
2.2.3.1 TRANSFORMADORES ELEVADORES	28
2.2.3.2 TRANSFORMADORES DE TRANSMISSÃO	28
2.2.3.3 TRANSFORMADORES DE SUBTRANSMISSÃO	28
2.2 3.4 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO	28
2.2.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	29
2.2.5 RESFRIAMENTO DOS TRANSFORMADORES	30
2.2.6 ÓLEO ISOLANTE	37
CAPÍTULO 3	39
ESTUDO EXPERIMENTAL	39
3.1 INTRODUÇÃO	39

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	40
3.2.1 RESERVATÓRIO DE ÓLEO	41
3.2.2 RADIADOR	42
3.2.3 VENTILADOR DO RADIADOR	43
3.2.4 BOMBA CENTRÍFUGA	44
3.2.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	45
3.2.6 ANALISADOR DE ENERGIA	47
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
CAPÍTULO 4	56
RESULTADOS E ANÁLISES	56
4.1 RESULTADOS DOS TESTES DE BANCADA	56
4.2 ANÁLISES	63
CAPÍTULO 5	65
CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema da micro aspersão de água em escoamentos de ar. Fonte: CAROSSO (2006)	17
Figura 2.2: Forma simplificada da distribuição de energia elétrica. Fonte: www.sigmatransformadores.com.br	22
Figura 2.3: Curva de expectativa de vida	24
Figura 2.4: Núcleo ferro magnético de um Transformador Fonte: Informações técnicas DT-11 WEG	25
Figura 2.5: Transformadores Elevadores	27
Figura 2.6: Principais componentes dos Transformadores	28
Figura 2.7: Fluxo do óleo isolante no transformador (ONAN). Fonte: www.sigmatransformadores.com.br	35
Figura 3.1: Composição geral da bancada experimental	40
Figura 3.2: Sistema de monitoramento e aquisição de dados	41
Figura 3.3: Reservatório de óleo acoplado ao radiador	42
Figura 3.4: Dimensões do bloco aletado do radiador. Fonte: Marangoni Indústria elétrica	43
Figura 3.5: Dados característicos do ventilador do radiador. Fonte: Marangoni Indústria elétrica	44
Figura 3.6: Bomba centrífuga para o sistema de pulverização. Fonte: Thebe Bombas Hidráulicas	44
Figura 3.7: Módulo de aquisição de dados. Fonte: National Instruments	45
Figura 3.8: Inversores de frequência do ventilador e bomba	46
Figura 3.9: Sensores de temperatura	46
Figura 3.10: Analisador de energia	47
Figura 3.11: Programação no LabView do sistema de controle	48
Figura 3.12: Sistema de aspersão utilizando canos de PVC	48
Figura 3.13: Bicos metálicos utilizados no sistema de pulverização	49
Figura 3.14: Sistema de aspersão utilizando tubos capitares	50

Figura 3.15: Tipos de bicos testados para o sistema de aspersão de água no radiador	50
Figura 3.16: Bico selecionado para compor o sistema final de resfriamento evaporativo do transformador de força	51
Figura 3.17: Foto infravermelho do radiador para identificação dos pontos de maior temperatura	52
Figura 3.18: Análise do posicionamento e quantidade dos bicos de pulverização de água	53
Figura 3.19: Filtro fino para evitar o entupimento dos bicos	53
Figura 3.20: Curva de resfriamento do sistema de arrefecimento do transformador	54
Figura 4.1: Resultado do Teste 1	56
Figura 4.2: Resultado do Teste 2	57
Figura 4.3: Resultado do Teste 3	58
Figura 4.4: Resultado do Teste 4	58
Figura 4.5: Resultado do Teste 5	59
Figura 4.6: Resultado do Teste6	59
Figura 4.7: Resultado do Teste 7	60
Figura 4.8: Resultado do Teste 8	60
Figura 4.9: Resultado do Teste 9	61
Figura 4.10: Resultado do Teste 10	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Redução da temperatura pelo resfriamento evaporativo	17
Tabela 2.2 – Limites de temperatura	25
Tabela 2.3 – Degradação do papel isolante	26
Tabela 2.4 – Limites de elevação de temperatura	32
Tabela 2.5 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Trifásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 15 KV	33
Tabela 2.6 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Trifásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 24,2 KV e 36,2 KV	33
Tabela 2.7 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Monofásicos de Tensão Máxima do Equipamento 15 KV	34
Tabela 2.8 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Monofásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 24,2 KV e 36,2 KV	34
Tabela 2.9 – Símbolos laterais	36
Tabela 2.10 – Ordem dos símbolos	37
Tabela 2.11 – Propriedades do óleo isolante	38

CAPÍTULO 1:

1.1 INTRODUÇÃO

Transformadores de força são uns dos principais equipamentos responsáveis pela transmissão e distribuição da energia elétrica. Sua finalidade é a conversão de diferentes níveis de tensão, permitindo de uma maneira viável a interligação entre os centros produtores e os consumidores finais. Visto sua importância, técnicas para prevenção, detecção e diagnóstico de falhas vêm sendo tema de estudo de vários pesquisadores da área.

A manutenção preventiva é uma técnica baseada na intervenção em equipamentos, corrigindo preventivamente situações ou componentes cuja deterioração ou desgaste é previamente conhecido. De uma forma prática, isto se traduz na substituição de partes dos equipamentos mais sujeitas ao desgaste, antes que venham a falhar, com o objetivo de prolongar a vida útil de todo o sistema e evitar a ocorrência de falhas.

Nos transformadores, o componente mais sujeito ao desgaste e deterioração é o sistema papel/óleo isolante. Assim, sua vida útil está diretamente relacionada à vida do isolamento sólido aplicado sobre as espiras. Portanto, observamos que a manutenção preventiva destes equipamentos não pode consistir na substituição periódica do papel isolante, devido ao alto custo desta operação. Nesses equipamentos, a manutenção preventiva consiste em minimizar os fatores que aceleram o envelhecimento do óleo e papel isolante.

O tanque principal onde fica a parte ativa é preenchido com óleo mineral que seus principais objetivos são, conferir características dielétricas ao sistema isolante do transformador, e circular pelo núcleo e enrolamentos, a fim de dissipar o calor gerado pelas perdas elétricas (efeito de histerese nas lâminas do núcleo, correntes de Foucault, resistências dos enrolamentos etc), aumentando com isso a vida útil do papel isolante. Logo esse calor absorvido pelo óleo deve ser dissipado da maneira mais eficiente possível para que esse consiga efetuar suas funções corretamente, pois esses gradientes de temperatura alteram suas características físico-químicas, produzindo bolhas, ácidos e gases que são altamente nocivos ao sistema isolante do transformador.

Nesse cenário o presente trabalho tem como objetivo principal, analisar métodos de dissipar o calor absorvido pelo óleo isolante, através da passagem desse pelo o aletado dos radiadores, utilizando para tanto resfriamento evaporativo, onde água será borrifada nos radiadores visando rápida e eficiente dissipação do calor.

1.2 JUSTIFICATIVA

Usinas, subestações, redes de distribuição de energia elétrica são compostas de vários equipamentos, tais como disjuntores, relés, fusíveis, cabos, torres, geradores, transformadores, reatores, dentre outros.

Os transformadores, geradores e reatores são os principais equipamentos do sistema, visto a grande indisponibilidade do sistema se algum desses falhar. Isso acontece principalmente porque nem sempre se dispõe de unidade reserva em estoque, custo elevado de aquisição, tais equipamentos não são fabricados em série visto sua demanda, o alto tempo de reparo, fabricação e transporte é bastante demorado.

Nosso estudo será direcionado para os transformadores, onde utilizaremos um sistema de controle automático que visa minimizar falhas e defeitos ocorridos devido aquecimento elevado do óleo isolante, através de um conjunto de ventiladores e borrifadores de água que irão retirar o calor do radiador de maneira mais eficiente, conseguindo com isso um aumento considerável na disponibilidade do sistema com um custo relativamente baixo.

O resfriamento evaporativo, técnica utilizado no nosso estudo, é um tema bastante comum de estudiosos e pesquisadores. Sabe-se que sua eficiência é aumentada quando o clima local de estudo é quente e seco, devido à rápida evaporação da água e com isso melhor troca de calor na interface água-ar.

A partir desses aspectos o estudo será direcionado a analisar a eficiência energética de um sistema de resfriamento evaporativo de transformadores de força, operando no semiárido brasileiro. O produto desenvolvido será automático e se ajustará as condições climáticas do local onde o transformador estiver operando.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica de todos assuntos pertinentes a essa pesquisa. O objetivo principal desse capítulo é o embasamento teórico dos temas que serão abordados durante a pesquisa.

No capítulo 3 será abordado o estudo experimental, mostrando como foi realizado os experimentos e os principais materiais e equipamentos utilizados. Mostra também como é a montagem do protótipo onde coletamos todos os dados e resultados para a conclusão dessa pesquisa. É o capítulo que visa esclarecer o real funcionamento do sistema auxiliar de arrefecimento proposto nessa pesquisa.

Na parte final desse trabalho, capítulo 4, será mostrado e discutido todos os resultados obtidos, com o objetivo de concluir, capítulo 5, se os resultados foram pertinentes para o que foi proposto no início do estudo. Esse é o capítulo de conclusões finais, onde será mostrado se o protótipo criado será eficiente ou não.

CAPÍTULO 2:

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão dos principais conteúdos envolvidos no estudo desta pesquisa, mostrando suas relevâncias e aplicações de acordo com o que está sendo ou já foi estudado.

2.1 Resfriamento evaporativo

Resfriamento evaporativo é uma técnica que utiliza a evaporação adiabática da água em contato com uma corrente de ar, a fim de reduzir a temperatura desse ar. O ar, como está mais quente, cede calor para que a água se evapore, reduzindo sua temperatura de bulbo seco e aumentando sua umidade, sem ocorrer nenhuma mudança de entalpia (daí o nome também comumente chamado de resfriamento adiabático). Devido ao seu princípio de funcionamento, esse processo tem sua eficiência aumentada em regiões com temperaturas mais elevadas e de baixa umidade relativa.

Camargo (2003) define o fenômeno do resfriamento evaporativo conforme segue:

O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa, através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água.

O resfriamento evaporativo foi a técnica pioneira nos sistemas onde se busca conforto térmico. Por volta de 2500 a.C no antigo Egito, escravos abanavam jarros de parede porosa com água, para resfriar o conteúdo. Uma fração de água armazenada evapora através da parede porosa do vaso, resfriando o líquido remanescente (Revista do frio/2001, pg46). Essa técnica também pode ser observada quando se aproxima de cachoeiras e sente o ar mais fresco, quando sai de uma piscina e tem a sensação de frio.

Além de um processo muito simples, o resfriamento evaporativo tem origem na própria natureza, e é através dele que o Planeta controla a temperatura sobre sua superfície (CAROSSI, 2005).

De registro, o primeiro mecanismo de resfriamento evaporativo foi construído por Leonardo da Vinci (1452-1519). Em um sistema compostos por uma roda d'água oca, com uma passagem de ar com a finalidade de guiar o ar resfriado, o efeito da evaporação da água no ar em movimento era obtido com a movimentação da roda.

Camargo (2003) comenta que a primeira análise rigorosa dos sistemas evaporativos direto foi feita por James Watt em 1963, onde o mesmo indicou as vantagens e desvantagens, principais aplicações e estabeleceu considerações sobre o projeto. Pode-se dizer que, a partir de seus trabalhos, a refrigeração evaporativa começou a ser investigada cientificamente.

Pescod (1979) desenvolveu um dos primeiros modelos matemáticos para simulação de refrigeração evaporativa. Seu modelo baseia-se em um trocador de superfície seca, ao qual ele aplica as hipóteses de trocador de calor ideal.

Eskra (1980) apresenta um sistema de dois estágios que combina um resfriador evaporativo direto e um indireto com o objetivo de melhorar a eficiência. Nesse equipamento, o primeiro estágio proporciona uma troca de calor sensível por meio de um trocador de calor de correntes cruzadas, de superfície molhada, com eficiência de 60%, e o segundo estágio utiliza um lavador de ar que proporciona uma eficiência de 90%, aproximando-se da saturação total.

Maclaine-Cross e Banks (1983) apresentam equações para modelar trocadores de calor evaporativos regenerativos e, para resolvê-las, aproximam a linha de saturação do diagrama psicrométrico a uma função linear entre a umidade de saturação e a temperatura de bulbo seco. Essa aproximação possibilita desacoplar as equações do lado seco das equações do lado úmido. Nessa análise, a transferência de calor e massa é descrita por dois potenciais combinados agindo independentemente, os quais correspondem à temperatura de bulbo úmido e à depressão de bulbo úmido em um trocador de calor de superfície molhada. Seu trabalho é muito referenciado.

Peterson e Hunn (1985) apresentam um estudo preliminar do potencial para reduzir a demanda elétrica nos horários de pico em pequenos edifícios de escritórios em 11 (onze) cidades americanas utilizando resfriadores evaporativos indiretos. O resultado é uma redução de 11% a 16% do consumo de energia, que é obtida pelo pré-resfriamento do ar

de ventilação e pela integração dos sistemas de iluminação e de resfriamento, utilizando sistemas de distribuição do ar por dutos instalados no teto.

Anderson (1986) examina a economia obtida por um sistema de condicionamento de ar evaporativo de três estágios indireto/direto onde o terceiro estágio é feito por refrigeração mecânica por expansão direta ou água gelada. Um estudo paramétrico é realizado para identificar as principais variáveis que influenciam economicamente na instalação do sistema, para justificar um investimento de capital adicional associado à instalação de um sistema evaporativo em lugar de um sistema de refrigeração mecânico convencional. Apresenta uma série de gráficos que permitem estimar o retorno de investimento (em anos) versus TBS de projeto, TBU de projeto, condições do ambiente condicionado e condições do ar insuflado. Conclui que o uso de sistemas evaporativos para condicionamento de ar para conforto é aconselhável somente em climas com temperaturas de bulbo úmido médias de 23°C ou menores ou em regiões com climas que apresentam temperaturas de bulbo seco de 32°C ou maiores.

Scheatzle; Wu e Yellott (1989) realizaram um estudo para determinar se a zona de conforto para verão, como apresentada pela ASHRAE, podia ser expandida para incluir condições obtidas em áreas de clima quente e seco, com uma combinação de resfriamento evaporativo e circulação do ar obtida por ventiladores de teto. O resfriamento evaporativo pode prover um resfriamento aceitável durante partes do ano em climas quentes e secos, mas não é satisfatório nos períodos em que a temperatura de bulbo úmido é alta.

Atualmente um dos modelos mais comumente utilizado como sistemas de resfriamento evaporativo é o da evaporação por micro aspersão de água em escoamentos de ar, conforme figura 2.1 (LAMBERTS *et al*, 2002). Nesse sistema a atomização da água é feita através de bombas que, com pressões entre 5 e 7 kPa, forçam a saída da água por bicos aspersores de pequeno diâmetro (0,2 mm), formando uma névoa composta por gotas muito pequenas, com diâmetros de aproximadamente 10 microns (LAMBERTS, 2002). A velocidade da corrente de ar também influencia na eficiência da evaporação das micro gotas de água.

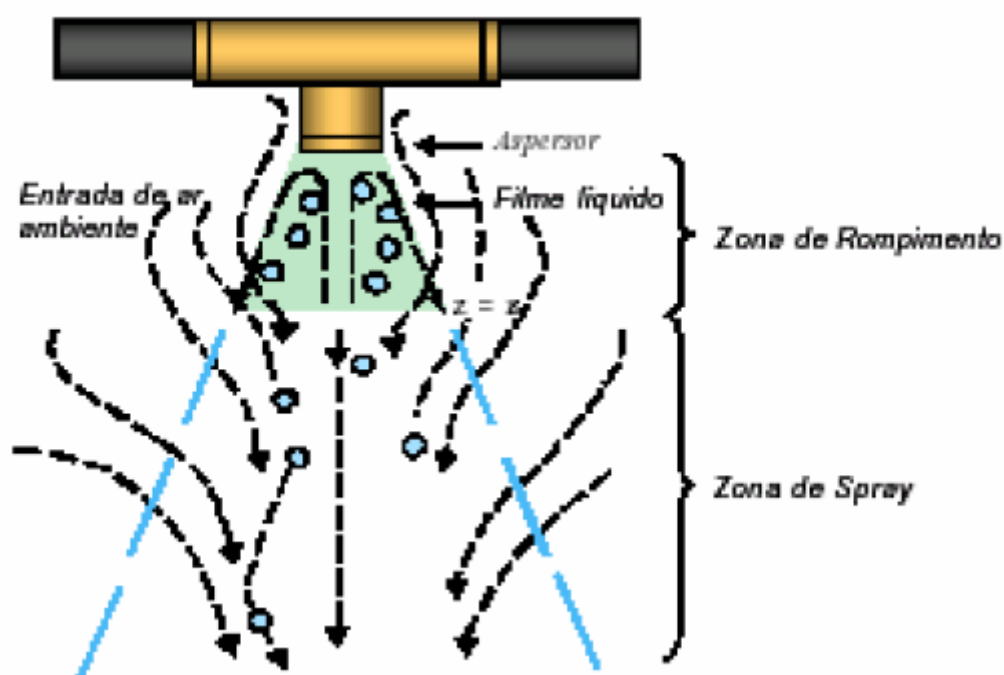


Figura 2.1: Esquema da micro aspersão de água em escoamentos de ar. Fonte: CAROSSI (2006).

O resfriamento evaporativo é um processo natural que diminui a temperatura do ar através da evaporação da água e consequentemente aumento de umidade, devido aos mecanismos simultâneos de troca de calor e massa. Além disso, é energeticamente eficiente e livre de poluição.

Uma condição para instalação de sistemas evaporativos é a preocupação com a qualidade da água de alimentação e o tratamento da mesma. Água com altos teores de minerais, principalmente cálcio, deve ser evitada, pois as concentrações dos solúveis tendem a aumentar com a evaporação, havendo precipitação. Como regra geral é recomendável água potável na alimentação dos resfriadores evaporativos.

A tabela abaixo mostra a redução da temperatura ambiente por meio de resfriamento evaporativo, a partir de valores conhecidos da temperatura e umidade relativa externa.

Tabela 2.1 – Redução da temperatura pelo resfriamento evaporativo

Temp. Externa	U.R. Externa	Temp. Resultante	Redução Temp.	Temp. Externa	U.R. Externa	Temp. Resultante	Redução Temp.
22°C	20%	12,5	9,5	34°C	20%	21	13
	25%	13	9		25%	22	12

	30%	14	8		30%	23	11
	35%	14,5	7,5		35%	24	10
	40%	15	7		40%	25	9
	45%	15,5	6,5		45%	26	8
	50%	16,5	5,5		50%	27	7
	55%	17	5		55%	28	6
	60%	18	4		60%	28,5	5,5
	65%	18,5	3,5		65%	29	5
	70%	19	3		70%	30	4
	75%	19,5	2,5		75%	31	3
23°C	20%	13	10	35°C	20%	21,5	13,5
	25%	14	9		25%	22,5	12,5
	30%	15	8		30%	24	11
	35%	15,5	7,5		35%	25	10
	40%	16	7		40%	25,5	9,5
	45%	16,5	6,5		45%	27	8
	50%	17,5	5,5		50%	28	7
	55%	18	5		55%	28,5	6,5
	60%	18,5	4,5		60%	29,5	5,5
	65%	19	4		65%	30	5
24°C	70%	20	3	36°C	70%	31	4
	75%	20,5	2,5		75%	31,5	3,5
	20%	13,5	10,5		20%	22,5	13,5
	25%	14,5	9,5		25%	23,5	12,5
	30%	15,5	8,5		30%	24,5	11,5
	35%	16	8		35%	25,5	10,5
	40%	17	7		40%	26,5	9,5
	45%	17,5	6,5		45%	27,5	8,5
	50%	18	6		50%	28,5	7,5
	55%	19	5		55%	29,5	6,5
25°C	60%	19,5	4,5	37°C	60%	30,5	5,5
	65%	20	4		65%	31	5
	70%	20,5	3,5		70%	32	4
	75%	21	3		75%	32,5	3,5
	20%	14,5	10,5		20%	23	14
	25%	15,5	9,5		25%	24	13
	30%	16	9		30%	25,5	11,5
	35%	17	8		35%	26,5	10,5
	40%	18	7		40%	27,5	9,5
	45%	18,5	6,5		45%	28,5	8,5
	50%	19	6		50%	29,5	7,5
	55%	20	5		55%	30	7
	60%	20,5	4,5		60%	31	6
	65%	21	4		65%	32	5
	70%	21,5	3,5		70%	33	4

	75%	22	3		75%	33,5	3,5
26°C	20%	15,5	10,5	38°C	20%	24	14
	25%	16	10		25%	25	13
	30%	17	9		30%	26	12
	35%	18	8		35%	27	11
	40%	19	7		40%	28,5	9,5
	45%	19,5	6,5		45%	29,5	8,5
	50%	20	6		50%	30,5	7,5
	55%	21	5		55%	31	7
	60%	21,5	4,5		60%	32	6
	65%	22	4		65%	33	5
	70%	22,5	3,5		70%	34	4
	75%	23	3		75%	34,5	3,5
27°C	20%	16	11	39°C	20%	24,5	14,5
	25%	17	10		25%	26	13
	30%	17,5	9,5		30%	27	12
	35%	18,5	8,5		35%	28	11
	40%	19	8		40%	29	10
	45%	20	7		45%	30	9
	50%	21	6		50%	31	8
	55%	22	5		55%	32	7
	60%	22,5	4,5		60%	33	6
	65%	23	4		65%	34	5
	70%	23,5	3,5		70%	35	4
	75%	24	3		75%	35,5	3,5
28°C	20%	17	11	40°C	20%	25	15
	25%	17,5	10,5		25%	26,5	13,5
	30%	18,5	9,5		30%	28	12
	35%	19	9		35%	29	11
	40%	20	8		40%	30	10
	45%	21	7		45%	31	9
	50%	21,5	6,5		50%	32	8
	55%	22,5	5,5		55%	33	7
	60%	23	5		60%	34	6
	65%	24	4		65%	35	5
	70%	24,5	3,5		70%	35,5	4,5
	75%	25	3		75%	-	-
29°C	20%	17,5	11,5	41°C	20%	26	15
	25%	18,5	10,5		25%	27,5	13,5
	30%	19,5	9,5		30%	28,5	12,5
	35%	20	9		35%	30	11
	40%	21	8		40%	31	10
	45%	22	7		45%	32	9
	50%	22,5	6,5		50%	33	8
	55%	23,5	5,5		55%	34	7

	60%	24	5		60%	35	6
	65%	24,5	4,5		65%	36	5
	70%	25,5	3,5		70%	-	-
	75%	26	3		75%	-	-
30°C	20%	18	12	42°C	20%	26,5	15,5
	25%	19	11		25%	28	14
	30%	20	10		30%	29	13
	35%	21	9		35%	30,5	11,5
	40%	22	8		40%	31,5	10,5
	45%	22,5	7,5		45%	33	9
	50%	23,5	6,5		50%	34	8
	55%	24	6		55%	35	7
	60%	25	5		60%	36	6
	65%	25,5	4,5		65%	-	-
	70%	26,5	3,5		70%	-	-
	75%	27	3		75%	-	-
31°C	20%	19	12	43°C	20%	27,5	15,5
	25%	20	11		25%	29	14
	30%	21	10		30%	30	13
	35%	21,5	9,5		35%	31	12
	40%	22,5	8,5		40%	32,5	10,5
	45%	23,5	7,5		45%	33,5	9,5
	50%	24,5	6,5		50%	34,5	8,5
	55%	25	6		55%	35,5	7,5
	60%	26	5		60%	36,5	6,5
	65%	26,5	4,5		65%	-	-
	70%	27	4		70%	-	-
	75%	28	3		75%	-	-
32°C	20%	19,5	12,5	44°C	20%	28	16
	25%	20,5	11,5		25%	29,5	14,5
	30%	21,5	10,5		30%	31	13
	35%	22,5	9,5		35%	32	12
	40%	23,5	8,5		40%	33,5	10,5
	45%	24	8		45%	34,5	9,5
	50%	25	7		50%	35,5	8,5
	55%	26	6		55%	36,5	7,5
	60%	27	5		60%	-	-
	65%	27,5	4,5		65%	-	-
	70%	28	4		70%	-	-
	75%	29	3		75%	-	-
33°C	20%	20,5	12,5	45°C	20%	29	16
	25%	21,5	11,5		25%	30	15
	30%	22,5	10,5		30%	31,5	13,5
	35%	23	10		35%	33	12
	40%	24	9		40%	34	11

	45%	25	8		45%	35,5	9,5
	50%	26	7		50%	36,5	8,5
	55%	27	6		55%	-	-
	60%	28	5		60%	-	-
	65%	28,5	4,5		65%	-	-
	70%	29	4		70%	-	-
	75%	30	3		75%	-	-

Fonte: Adaptada de <http://www.basenge.com.br> (2015)

Podemos notar pelo resultado obtido nessa pesquisa, que a capacidade de resfriar o ar ambiente é aumentada em condições de baixa umidade relativa e alta temperatura de bulbo seco. Sendo essas as condições presentes nas regiões semiáridas do Brasil, podemos concluir que tais regiões são ideais para esse tipo de sistema, mostrando um alto potencial para aplicação da técnica.

2.2 Transformadores de potência

Nesse tópico abordaremos as principais características dos transformadores de potência, o princípio de funcionamento, os principais componentes, os tipos de resfriamento (a óleo ou a seco), falhas decorrentes de falta de manutenção, etc.

2.2.1 Introdução

Para que a energia elétrica chegue as nossas casas, vários processos são realizados desde a geração nas hidros ou termoelétricas. A força hidráulica de rios ou força do vapor superaquecido é convertida em energia elétrica no gerador, ou seja, esse equipamento tem a função de converter energia mecânica ou térmica em energia elétrica. O transporte dessa energia desde sua geração até os consumidores finais é bastante distante, sendo necessário, por motivos econômicos de bitola do cabo condutor, elevar a tensão do ponto de geração e diminuir a tensão próxima dos centros de consumo, por motivos de segurança (figura 2). Por motivos técnico-econômicos os geradores de energia elétrica, por maiores que sejam, são projetados para gerar tensões de até no máximo 25 kV. Essa tensão é elevada para valores da ordem de 400 kV, em seguida próximo aos centros consumidores sua tensão é reduzida para uma tensão intermediária e por fim reduzida

para níveis de tensão de consumo. O equipamento responsável por todas essas etapas é o transformador de potência.

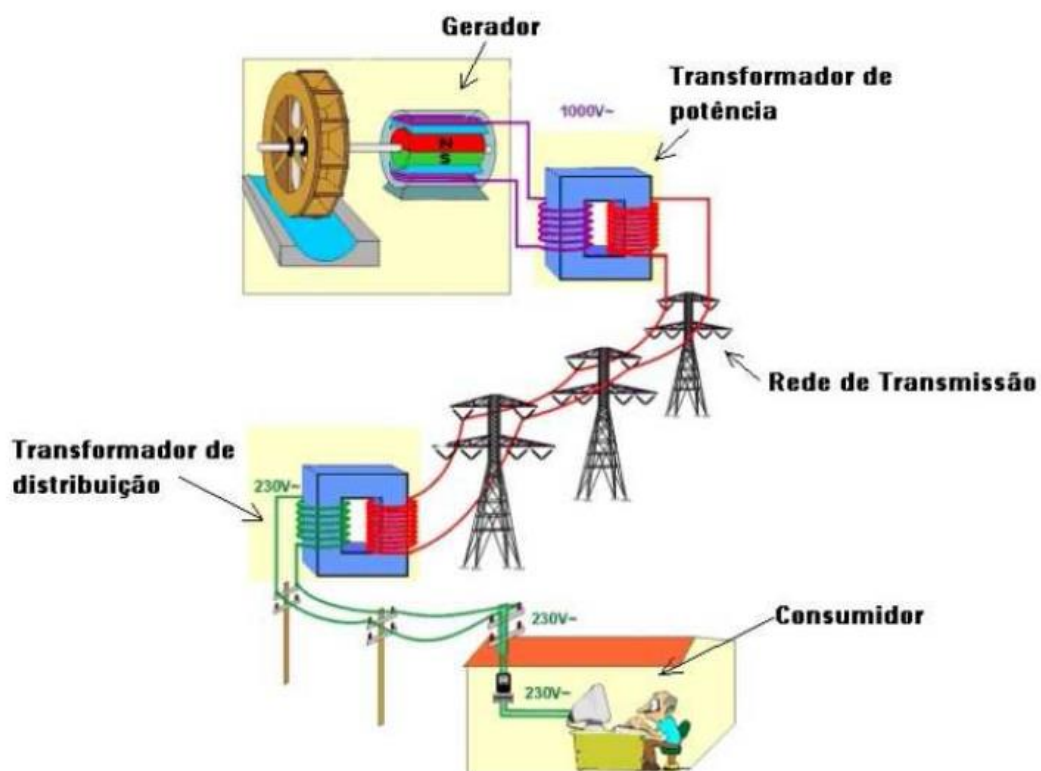


Figura 2.2 – Forma simplificada da distribuição de energia elétrica. Fonte: www.sigmatransformadores.com.br.

De acordo com a norma brasileira NBR 5356-1/2008 – Transformador é um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternadas em outro sistema de tensão e corrente, de valores geralmente diferentes, mas à mesma frequência, com objetivo de transmitir corrente elétrica.

O princípio de funcionamento do transformador foi descoberto em 1831 por Faraday, assim enunciado: quando duas bobinas estão montadas sobre um anel de ferro comum a elas e uma delas for ligada a uma tensão alternada, surge na outra, devido ao princípio da ação eletromagnética alternada, também uma tensão alternada. A grandeza dessa tensão corresponde à relação das espiras das duas bobinas. Com um transformador consegue-se, portanto, de forma bastante simples obter uma tensão mais alta a partir de uma tensão mais baixa, e também o inverso.

Os transformadores podem ser classificados de diversas maneiras, em relação à refrigeração, eles podem ser a óleo ou a seco, quanto aos níveis de tensão podem ser elevadores (eleva a tensão do enrolamento secundário em relação ao primário) e abaixador (abaixa a tensão do enrolamento secundário em relação ao primário), podem ser trifásicos ou monofásicos, quanto as ligações podem ser ligadas em estrela, triângulo (delta) ou zig-zag.

Devido a sua extrema importância na distribuição da energia elétrica, as concessionárias de energia têm implantado continuamente a otimização dos processos de manutenção e diagnóstico de estado. Dentre as principais razões para tal preocupação, estão alguns aspectos associados ao elevado custo de aquisição, de reparo e de substituição destes equipamentos que podem chegar a milhões de dólares, e também à necessidade de manter uma elevada confiabilidade operativa dos serviços de fornecimento de energia, nos níveis exigidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (MARQUES,2004).

O sistema papel isolante, componente de fundamental importância no projeto de transformadores de potência, é submetido a um processo contínuo de degradação por ação da água, oxigênio e ácidos presentes no óleo isolante. Mantendo-se sob controle a ação desses contaminantes, o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e cumulativo (NBR5416, 2007). O envelhecimento está baseado na vida esperada do transformador, sob efeito da temperatura de operação da isolação ao longo do tempo. Segundo a mesma norma, a expectativa de vida, em horas, dos transformadores é fundamentada na teoria de Arrhenius, formulada como segue:

$$\log(vida) = A + \frac{B}{T} \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde:

T: temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em K;

A e B: constantes da curva de expectativa de vida;

Calcula-se a perda de vida, ao longo de um período de tempo Δt (horas), em que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (T) permanece constante, pela equação:

$$PV\% = 10^{\left(\frac{B}{T} + A\right)} \cdot 100\Delta t$$

onde:

$A = -14,133$ (Transformador classe 55°C)

$A = -13,391$ (Transformador classe 65°C)

$B = 6972,15$

O valor obtido representa a taxa de envelhecimento global a que é submetida à isolamento sólida, no intervalo de tempo Δt (ver tabela 2.3).

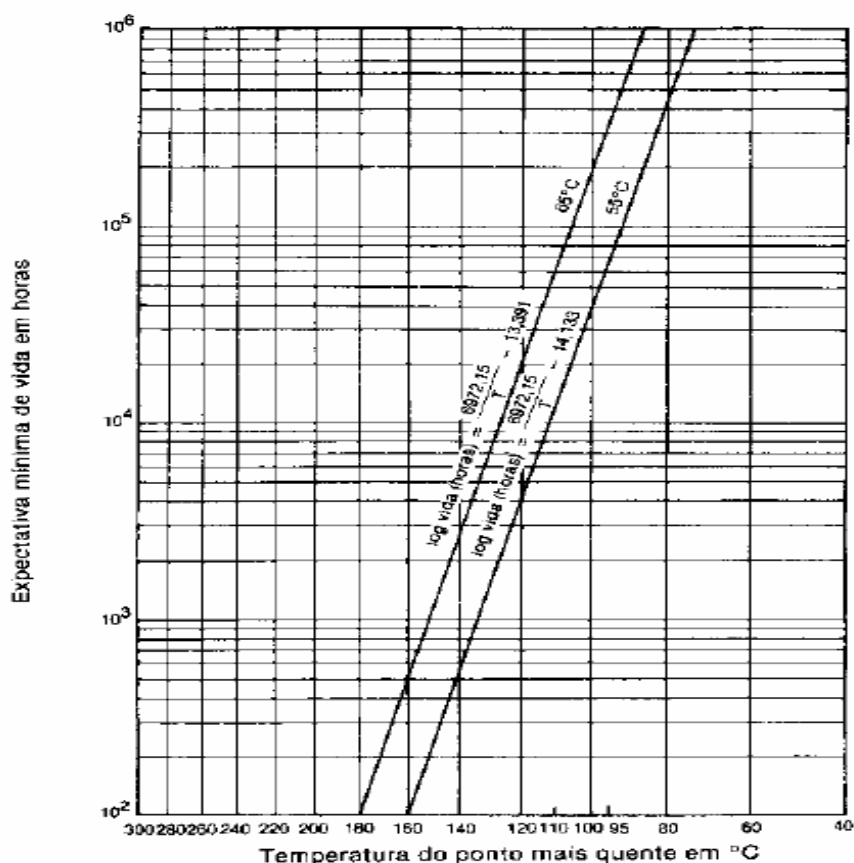


Figura 2.3 – Curva de expectativa de vida. Fonte: NBR5416/97

Transformador classe 55°C: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55°C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65°C;

Transformador classe 65°C: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65°C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80°C.

As características que mais influenciam no cálculo da perda de vida útil de um transformador são:

- elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento (sob carga nominal) sobre a temperatura do topo do óleo, que é obtida a partir da temperatura média do enrolamento acrescida de 10 °C para transformadores de classe 55 °C e de 15 °C para transformadores de classe 65 °C;

- elevação da temperatura no topo do óleo (sob carga nominal) em relação à temperatura ambiente;

- constante de tempo térmica do transformador;

- constante de tempo térmica do ponto mais quente;

- relação entre as perdas em carga (sob carga nominal) e as perdas em vazio;

- expoente usado no cálculo de elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do método de resfriamento do transformador em funcionamento;

- expoente usado no cálculo de elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento do transformador em funcionamento.

Dessa forma, uma maneira de melhorar a disponibilidade dos transformadores de potência é através do aperfeiçoamento do processo de transferência do calor gerado pelos seus componentes no interior do núcleo. O calor gerado no núcleo é absorvido pelo óleo isolante e este transferido para o meio nos radiadores, de maneira tal que não afete o funcionamento do transformador, principalmente evitando a deterioração do papel isolante, um componente bastante oneroso de se substituir.

As temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente, para uma perda de vida útil dentro dos limites aceitáveis, são limitadas pela NBR 5416/97:

Tabela 2.2 – Temperaturas limites

Transformador	55°C	65°C
Máxima temperatura do topo do óleo	95°C	105°C
Máxima temperatura do ponto mais quente	105°C	120°C

Fonte: NBR 5416/97

Tabela 2.3 – Perda de vida do papel isolante

Temperatura (°C)	Papel (classe 55°C)		Papel (classe 65°C)	
	Expectativa de vida (anos)	Perda de vida (%/ano)	Expectativa de vida (anos)	Perda de vida (%/ano)
75	91,08	1,0979		
80	47,38	2,1105		
85	25,11	3,9824	138,60	0,7215
90	13,54	7,3855	74,73	1,3381
95	7,42	13,4770	40,98	2,4402
100	4,14	24,1545	22,83	4,3802
105	2,34	42,7350	12,92	7,7399
110	1,4		7,42	13,4770
115	0,8		4,32	23,1481
120	0,45		2,55	39,2156

Sendo assim a refrigeração dos transformadores se tornou ponto chave no cenário atual das concessionárias, que visam sempre a maior disponibilidade de seus equipamentos, principalmente os transformadores.

2.2.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do transformador foi descoberto em 1831 por Faraday, como enunciado anteriormente. O fenômeno da transformação é baseado no efeito da indução mútua. Veja a Figura 2.4, onde temos um núcleo constituído de lâminas de aço prensadas e onde foram construídos dois enrolamentos.

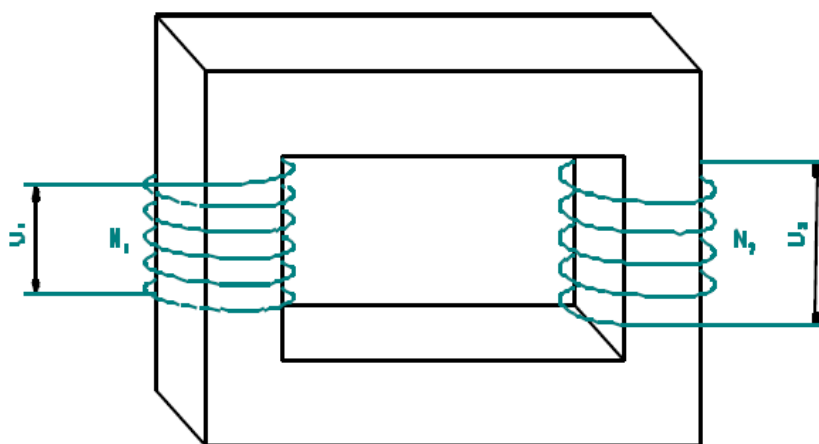


Figura 2.4 – Núcleo ferro magnético de um Transformador Fonte: Informações técnicas DT-11 WEG

Onde:

U_1 = tensão aplicada ao primário

N_1 = número de espiras do primário

U_2 = tensão de saída (secundário)

N_2 = número de espiras do secundário

Se aplicarmos uma tensão U_1 alternada ao primário, circulará por este enrolamento uma corrente I_1 alternada que por sua vez dará condições ao surgimento de um fluxo magnético induzido também alternado. Este fluxo originará uma força eletromotriz (f.e.m.) E_1 no primário e E_2 no secundário, proporcionais ao número de espiras dos respectivos enrolamentos, segundo a relação:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Eq. 2.3}$$

As tensões de entrada e saída U_1 e U_2 diferem muito pouco das f.e.m. induzidas E_1 e E_2 e para fins práticos podemos considerar:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Quando a tensão do primário U_1 é superior à do secundário U_2 , temos um transformador abaixador (step down). Caso contrário, teremos um transformador elevador de tensão (step up).

2.2.3 Tipos de Transformadores

Existem várias maneiras de classificar os tipos de transformadores, seja quanto aos enrolamentos (Autotransformadores, Transformadores de dois ou mais enrolamentos), quanto ao número de fases (monofásicos ou trifásicos), quanto à refrigeração (Transformadores imersos ou Transformadores a seco), quanto a forma do núcleo (shell ou core), etc. A maneira mais comumente utilizada de classificar os tipos de transformadores é quanto a sua aplicação (Transformadores elevadores, Transformadores de transmissão e subtransmissão e Transformadores de distribuição).

2.2.3.1 Transformadores Elevadores

São transformadores utilizados no sistema de geração para elevar os níveis de tensão produzida pelos geradores, normalmente dotados de dois enrolamentos. A bobina do primário recebe baixa tensão do gerador, geralmente até 20kV, e a bobina do secundário, a qual é ligada a carga, produz elevados níveis de tensão, até 550kV.

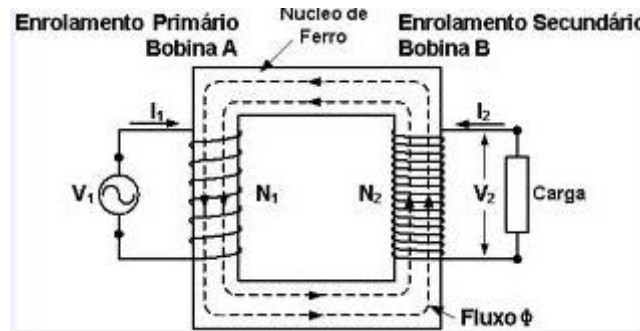


Figura 2.5 – Transformadores elevadores.

2.2.3.2 Transformadores de Transmissão

São transformadores utilizados em subestações para interligar linhas e sistemas em diferentes níveis de tensão. Suas características construtivas são mais complexas do que as dos transformadores elevadores no que diz respeito ao sistema de regulação de tensão e número de enrolamentos, sendo dotados de comutadores de sob carga. Seus níveis de tensão podem chegar até 765 kV no primário, até 550 kV no secundário e no terciário 13,8 kV ou 69 kV.

2.2.3.3 Transformadores de Subtransmissão

São utilizados para rebaixar os níveis de recebidos da linha de transmissão para alimentação do sistema de distribuição. Sua construção é bastante semelhante com os transformadores de transmissão. Seus níveis de tensão podem atingir até 138 kV no primário, até 34,5 kV no secundário e 13,8 ou 6,9 kV no terciário.

2.2.3.4 Transformadores de Distribuição

São transformadores de pequeno porte utilizados para rebaixar os níveis de tensão recebidos das linhas de transmissão para alimentação dos consumidores finais. São dotados de dois enrolamentos, com sistema de comutação a vazio no lado de alta tensão. Os níveis de tensão do primário são de até 34,5 kV e no secundário até 440V.

2.2.4 Características construtivas

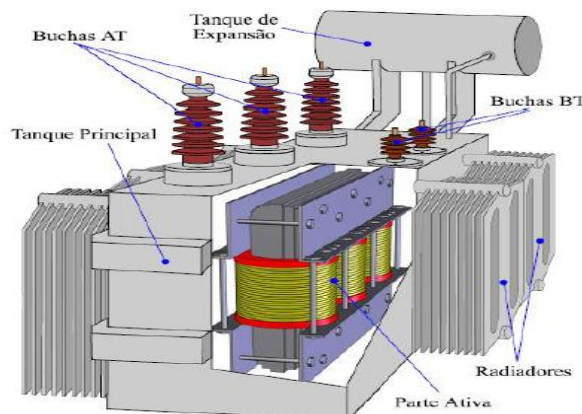


Figura 2.6 – Principais componentes dos Transformadores.

- 1) **Parte ativa:** compostos pelo núcleo e enrolamentos. O núcleo é construído em laminas de material ferromagnético por onde o fluxo magnético induzido irá circular. Os enrolamentos são bobinas cilíndricas formadas por condutores de cobre. A relação entre o número de espiras dos diversos enrolamentos do transformador define seus níveis de tensão de operação, havendo a possibilidade de se fazer bobinas com terminais intermediários, denominados por taps, que podem ser comutados, com a limitação de que o transformador esteja sem tensão ou até mesmo com o transformador operando sob carga mediante a utilização de chaves comutadoras de características especiais (comutador sob carga).
- 2) **Tanque principal:** trata-se do tanque de aço preenchido com óleo isolante, onde a parte ativa, conjunto formado pelas bobinas e o núcleo, é imerso. O tanque pode ser dotado de blindagens nas paredes internas, no sentido de minimizar o aumento da temperatura do aço por conta da circulação de correntes parasitas, resultantes do fluxo de dispersão gerado na parte ativa.
- 3) **Óleo isolante:** Suas funções principais são duas:
 - i. Ser absorvido (impregnado) pelo papel isolante de forma a conferir características dielétricas especiais ao sistema isolante do transformador;
 - ii. Circular através dos enrolamentos e núcleo, superficialmente e através de reentrâncias, canais feitos especialmente com essa finalidade, de forma a permitir a remoção do calor gerado no

funcionamento normal, dissipando assim as perdas nos enrolamentos e no núcleo.

- 4) **Tanque de expansão:** permite a expansão do volume de óleo do transformador por conta das variações de temperatura.
- 5) **Buchas:** são dispositivos de porcelana que têm a finalidade de isolar os terminais das bobinas.
- 6) **Comutador sob carga:** dispositivo eletromecânico que propicia a variação dos níveis de tensão através da mudança dos terminais dos enrolamentos de regulação, sem que o transformador seja desligado.
- 7) **Radiadores:** instalados na parte externa dos transformadores, têm a função de dissipar o calor que o óleo absorve no interior do tanque.
- 8) **Secador de ar:** faz a retirada de umidade do interior do transformador utilizando sílica-gel.
- 9) **Termômetros:** medem a temperatura dos enrolamentos e do óleo do transformador.

2.2.5 Resfriamento dos Transformadores

Para evitar que se atinjam temperaturas elevadas, que possam comprometer o isolamento dos enrolamentos, é preciso dotar o transformador de um sistema de refrigeração adequado. Com o aumento das perdas do transformador, o número e o tamanho dos radiadores necessários para resfriar o óleo aumenta. Eventualmente, um ponto é atingido no qual o ar e a convecção natural não são suficientes para eliminar o calor, e, com isso, torna-se necessário forçar, com motores, a passagem de ar através dos radiadores (NOGUEIRA & ALVES, 2009).

Da mesma forma que a capacidade de resfriamento é aumentada pelo uso do ar forçado, a capacidade de carregamento do transformador também é aumentada, podendo chegar a 125%, ou até mesmo 130% da potência nominal. Ao conectar mais carga ao transformador, pode ser atingida uma situação em que a temperatura interna do equipamento seja a máxima suportável. Neste caso, desejando-se aumentar o carregamento, a solução é aumentar a velocidade do óleo, bombeando-o com bombas localizadas na parte inferior dos radiadores (NOGUEIRA & ALVES, 2009).

Qualquer transformador de potência é envolvido por perdas nos processos de conversão dos níveis de tensão e corrente. Essas perdas geralmente na forma de calor afeta o funcionamento do transformador, podendo levar a um desgaste excessivo e

posterior falha do equipamento. Sendo assim é imprescindível a rápida retirada do calor gerado.

As perdas no transformador, oriundas do cobre (enrolamentos) e do ferro (núcleo), causam elevação de temperatura em seus componentes. Tais efeitos podem alterar as características dos materiais que os constituem, principalmente os isolantes, comprometendo o desempenho e a segurança do equipamento.

Duas principais características do isolamento devem ser consideradas em conjunto, para se determinar o efeito de temperaturas mais altas que o normal sobre o isolamento de um transformador, a rigidez dielétrica e a resistência mecânica.

A perda de potência por efeito Joule nos transformadores é devido basicamente a três tipos de perdas.

- Perdas no cobre que resultam da resistência dos fios de cobre nas espiras primárias e secundárias, estas perdas são representadas pela expressão I^2R e dependem da carga aplicada ao transformador;
- Perdas por histerese, energia é transformada em calor na reversão de polaridade magnética do núcleo do transformador. São perdas provocadas pela propriedade das substâncias ferromagnéticas de apresentarem um atraso entre a indução magnética (B) e o campo magnético (H); o fenômeno da histerese é análogo ao da inércia mecânica;
- Perdas por correntes parasitas ou de Foucault, quando uma peça de metal condutor se desloca num campo magnético, ou é submetida a um fluxo magnético móvel, circulam na peça corrente induzidas. São pequenos circuitos de correntes induzidas circulando em planos perpendiculares ao fluxo magnético e conhecidas como correntes parasitas, estas são proporcionais ao quadrado da indução. Este efeito é diminuído laminando-se o núcleo e isolando as folhas.

Esses valores de perdas são essenciais no projeto de um transformador, pois segundo a ABNT NBR 5440, os valores das perdas são fatores limitantes que dependem da potência, do número de fases e da tensão do primário. Além das perdas outro fator limitante no projeto de um transformador é a máxima temperatura que o óleo e os enrolamentos podem atingir.

A temperatura ambiente também é um fator importante para o projeto do transformador, uma vez que a elevação de temperatura para qualquer carga deve ser acrescida da ambiente para se obter a temperatura de operação.

Segundo a NBR 5356, para transformadores resfriados a ar, a temperatura do ar de resfriamento (temperatura ambiente) não deve ser superior a 40°C e a temperatura média em qualquer período do dia não deve ser superior a 30°C. Para transformadores resfriados a água, a Temperatura da água de resfriamento (temperatura ambiente para o transformador) não deve ser superior a 30°C e a temperatura média em qualquer período do dia não-superior a 25°C. Adicionalmente, a temperatura mínima da água de resfriamento não-inferior a 1°C, exceto se forem utilizados anti-congelantes adequados para funcionamento com temperatura de -20°C. Altitude não deve ser superior a 1000 m.

A NBR 5356 estabelece os seguintes limites para as temperaturas:

Tabela 2.4 – Limites de elevação de temperatura.

Tipos de transformadores		Limites de elevação de temperatura (°C) ^(A)					
		Dos enrolamentos			Do óleo	Das partes metálicas	
		Método da variação da resistência		Do ponto mais quente		Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a ela	Não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a ela
		Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido				
Em óleo	Sem conservador ou sem gás inerte acima do óleo	55	60	65	50 ^(B)	Não devem atingir temperaturas superiores à máxima especificada para o ponto mais quente da isolamento adjacente ou em contato com esta	A temperatura não deve atingir, em nenhum caso, valores que venham a danificar estas partes, outras partes ou materiais adjacentes
	Com conservador ou com gás inerte acima do óleo	55 65 ^(D)	60 70 ^(D)	65 80 ^(D)	55 ^(C) 65 ^(D)		

^(A) Os materiais isolantes, de acordo com experiência prática e ensaios, devem ser adequados para o limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.

^(B) Medida próxima à superfície do óleo.

^(C) Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.

^(D) Quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.

Fonte: NBR5356

Caso os valores para temperatura do ar e da água de resfriamento excedam os valores citados anteriormente em até 10°C, os valores da tabela 2.1 para limites de temperatura devem ser reduzidos. Quando a potência nominal do transformador for igual ou superior a 10MVA, a redução deve corresponder ao excesso de temperatura. Para potências nominais inferiores a 10MVA, as reduções devem ser as seguintes:

- a) 5°C, se o excesso de temperatura for igual ou inferior a 5°C;

- b) 10°C, se o excesso de temperatura for superior a 5°C e igual ou inferior a 10°C.

A NBR 5440 estabelece, através das tabelas abaixo, os limites para as perdas.

Tabela 2.5 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Trifásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 15 KV.

Potência [kVA]	Corrente de excitação máxima [%]	Perdas em vazio máxima [W]	Perdas totais máxima [W]	Tensão de curto - circuito a 75 °C [%]
1	2	3	4	5
15	4,8	100	440	3,5
30	4,1	170	740	
45	3,7	220	1000	
75	3,1	330	1470	
112.5	2,8	440	1990	
150	2,6	540	2450	
225	2,3	765	3465	4,5
300	2,2	950	4310	

Fonte: NBR5440

Tabela 2.6 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Trifásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 24,2 KV e 36,2 KV.

Potência [kVA]	Corrente de excitação máxima [%]	Perdas em vazio máxima [W]	Perdas totais máxima [W]	Tensão de curto - circuito a 75 °C [%]
1	2	3	4	5
15	5,7	110	500	4,0
30	4,8	180	825	
45	4,3	250	1120	
75	3,6	360	1635	
112,5	3,2	490	2215	
150	3,0	610	2755	
225	2,7	820	3730	5,0
300	2,5	1020	4620	

Fonte: NBR5440

Tabela 2.7 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Monofásicos de Tensão Máxima do Equipamento 15 KV.

Potência [kVA]	Corrente de excitação máxima [%]	Perdas em vazio máxima [W]	Perdas totais máxima [W]	Tensão curto - circuito a 75 °C [%]
1	2	3	4	5
3	4,9	40	115	2,5
5	4,0	50	160	
10	3,3	60	260	
15	3,0	85	355	
25	2,7	120	520	
37,5	2,4	160	700	
50	2,2	190	830	
75	2,0	230	1160	
100	1,9	280	1500	

Fonte: NBR5440

Tabela 2.8 - Valores Garantidos de Perdas, Correntes de Excitação e Tensões de Curto-Circuito em Transformadores Monofásicos de Tensão Máxima do Equipamento de 24,2 KV e 36,2 KV.

Potência (kVA)	Corrente de excitação máxima [%]	Perdas em vazio máxima [W]	Perdas totais máxima [W]	Tensão curto - circuito a 75 °C [%]
1	2	3	4	5
3	5,7	40	115	2,5 (para 24,2kV)
5	4,8	50	170	
10	4,0	70	285	
15	3,6	90	395	
25	3,1	130	580	
37,5	2,9	170	775	3,0 (para 36,2kV)
50	2,7	220	975	
75	2,1	250	1260	
100	1,5	300	1550	

Fonte: NBR5440

Portanto todo esse calor gerado no interior do transformador deve ser absorvido pelo o óleo isolante e transferido para o meio ambiente nos radiadores. Com isso o isolamento sólido das espiras, que tem a função de isolar eletricamente as bobinas, tem

sua vida útil aumentada, pois quanto mais eficiente for a refrigeração das bobinas, menos se degradará o material isolante.

O óleo dielétrico que o núcleo do transformador é submerso absorve o calor gerado pelas perdas, com isso o óleo é aquecido e correntes convectivas surgem no interior do transformador. Com o óleo mais quente ele fica menos denso e sobe, entrando nos radiadores, na parte superior, perde calor para o meio externo, resfriando-se e aumentando sua densidade, com isso desce e retorna para o interior do transformador, num fenômeno conhecido por termo-sifão. Existe também sistema que utilizam de bombas e ventiladores para melhorar o sistema de refrigeração dos transformadores, a seguir veremos os principais tipos.

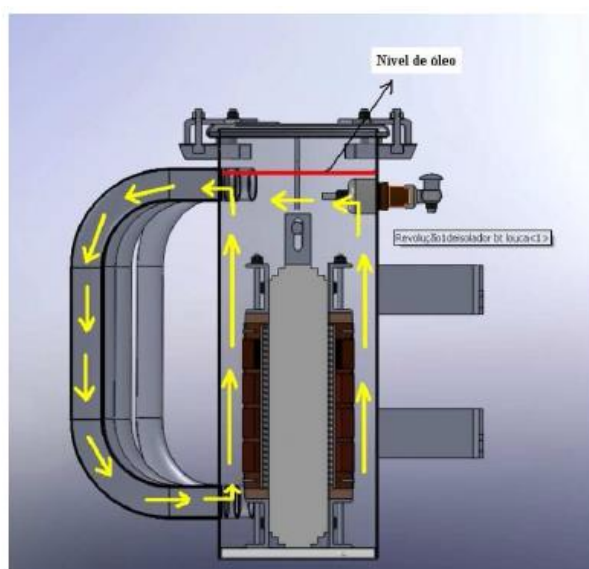


Figura 2.7 – Fluxo do óleo isolante no transformador (ONAN). Fonte: www.sigmatransformadores.com.br.

A técnica mais simples é a de refrigeração natural a ONAN (óleo natural, ar natural) que utiliza o ar e a convecção natural para refrigerar o óleo nos radiadores, sendo o fluxo de óleo estimulado naturalmente por gradientes de temperatura num fenômeno conhecido como termo-sifão, descrito anteriormente. Esse sistema é usado em transformadores de pequeno porte.

A técnica que usa ventiladores para forçar o fluxo de ar nos radiadores é a ONAF (óleo natural, ar forçado), que é bastante utilizado em transformadores de médio a grande porte. Esses ventiladores podem ser acionados manualmente ou automaticamente por um termômetro de imagem térmica ou sistema digital. Os ventiladores podem ser montados

na lateral ou na parte inferior dos radiadores. Normalmente o acréscimo de potência com um sistema de ventilação forçada situa-se em torno de 25%.

Existe a técnica que utiliza um sistema de bombeamento para provocar a circulação do óleo no interior do transformador a OFAF (óleo forçado, ar forçado). Essas bombas podem ser helicoidais ou centrífugas. As bombas são acionadas tanto manualmente quanto automaticamente pela imagem térmica ou sistema digital. Possui a vantagem de que torna o transformador menor em termos de dimensão, largura e comprimento. Requerido para transformadores de grande porte.

E a técnica que utiliza, além do ar, água para a refrigeração, que é a OFWF (óleo forçado, água forçada), essas são técnicas utilizados em transformadores de grande porte. Micros borrifadores são instalados para provocar uma queda na temperatura do ar ambiente, através do resfriamento evaporativo, fazendo com que a convecção nos radiadores seja mais rápida e eficiente. Além dos borrifadores de água, em usinas hidroelétricas, são utilizados trocadores de calor tipo casca-tubo, nesse sistema o óleo é forçado a passar no trocador por uma bomba e a água vem de uma torre de resfriamento ou água corrente proveniente de um rio.

Essa nomenclatura é baseada na NBR5356, como pode ser visto nas tabelas abaixo:

Tabela 2.9 – Símbolos laterais

Natureza do meio de resfriamento	Símbolo
Óleo	O
Líquido isolante sintético não-inflamável	L
Gás	G
Água	W
Ar	A
Natureza da circulação	Símbolo
Natural	N
Forçada (no caso de óleo, fluxo não dirigido)	F
Forçada com fluxo de óleo dirigido ^(A)	D

^(A) Em transformadores com circulação forçada com fluxo de óleo dirigido, certa proporção do fluxo de óleo forçado é canalizada através dos enrolamentos. Certos enrolamentos, no entanto, podem ter fluxo de óleo não dirigido; por exemplo, enrolamentos de regulação separados e enrolamentos terciários.

Fonte: NBR5356

Tabela 2.10 – Ordem dos símbolos

Primeira letra	Segunda letra	Terceira letra	Quarta letra
Indicativa do meio de resfriamento em contato com os enrolamentos		Indicativa do meio de resfriamento em contato com o sistema de resfriamento externo	
Natureza do meio de resfriamento	Natureza da circulação	Natureza do meio de resfriamento	Natureza da circulação

Fonte: NBR5356

2.2.6 Óleo isolante

Em geral transformadores de médio e grande porte possuem seu sistema isolante composto por uma parte sólida (papel isolante) e uma parte líquida (óleo isolante). Esse conjunto tem a função de garantir a rigidez dielétrica e mecânica do bobinado. Os óleos isolantes possuem dupla finalidade: garantir isolamento entre os componentes do transformador e dissipar para o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo.

Para que o óleo possa cumprir satisfatoriamente as duas condições acima, devem apresentar as seguintes características fundamentais:

- Boa condutividade térmica;
- Bom isolamento elétrico;
- Baixa viscosidade;
- Boa estabilidade térmica;
- Baixa reatividade química;
- Elevado ponto de fulgor;

Existem basicamente três tipos de líquidos isolantes que são usados nos transformadores: os óleos minerais, obtido da refinação do petróleo, são hoje os mais utilizados. Os fluidos a base de silicone, recomendados para áreas de alto grau de segurança. E o ascarel, cuja utilização é proibida aqui no Brasil, devido à agressão que o mesmo provoca ao meio ambiente. Outro fluido que está sendo estudado para utilização em transformadores de potência é o óleo vegetal envirotemp, que tem por vantagem além de ser biodegradável possuir alto ponto de fulgor.

O isolamento entre as espiras é feito por meio de isolantes sólidos, seja um papel ou verniz, colocados sobre a superfície do condutor. Com a passagem de corrente elétrica através desses condutores, sabemos que calor é gerado por efeito Joule, esse calor

degradará termicamente o material isolante, sendo assim é fácil observar que quanto mais eficiente esse calor for removido maior será a vida útil do sistema.

Assim notamos que uma das principais funções dos fluidos isolantes é a refrigeração das espiras. Além disso, pode-se notar que quanto mais eficientes forem as características isolantes dos fluidos utilizados, maior será a viabilidade econômica dos transformadores, por menor serem as quantidades dos isolantes sólidos e pela diminuição das distâncias entre as espiras, entre bobinas e núcleo e entre estes e as partes aterradas, diminuindo assim o tamanho do transformador. Portanto as principais funções do óleo são refrigeração e isolamento térmico.

Óleo isolante utilizado nessa pesquisa é base mineral naftênica, inibido com antioxidante BHT, para uso em transformadores de todas as classes de tensão. O fabricante/referência do óleo é: LUBRAX AV 70 IN, severamente hidro tratado e apresenta um baixo fator de potência associado com alta estabilidade à oxidação. Ele é recomendado para transformadores, disjuntores e equipamentos de manobra operando sob qualquer classe de tensão.

Tabela 2.11 – Propriedades do óleo isolante

Propriedade	Método	Resultado
Densidade 20/4°C	ASTM D4052	0,880
Viscosidade a 40°C	ASTM D445	9,81 cSt
Viscosidade a 100°C	ASTM D445	2,43 cSt
Ponto de fulgor - vaso aberto	ASTM D92	148 °C
Ponto de fluidez	ASTM D97	-57 °C
Tensão interfacial a 25°C	ASTM D971	48 dyn/cm
Ponto de anilina	ASTM D611	80 °C
Rigidez dielétrica, eletrodos de disco, 2,5 mm	ASTM D877	40 kV
Rigidez dielétrica sob condições de impulso	ASTM D3300	173 kV
Fator de potência a 90°C	ASTM D924	0,04 %
Teor de BHT	infravermelho	0,30 %m
Índice de acidez total	ASTM D974	<0,02 mg KOH/g
Cloretos e sulfatos	ASTM D878	ausentes
Enxofre corrosivo	ASTM D1275B	não corrosivo
Estabilidade à oxidação, 164h	ASTM D2440	
. borra		0,01 %m
. índice de acidez total		0,02 mg KOH/g
Estabilidade à oxidação, 500h	IEC 61125	
. borra		0,06 %m
. índice de acidez total		0,07 mg KOH/g
. Fator de potência a 90°C após oxidação		2,9%
Bomba rotatória	ASTM D2112	320 min
Teor de PCB	ASTM D4059	ausente
Gassing	ASTM D2300 B	+22,7 µL/min
Teor de policíclicos aromáticos	IP 346	1,5 %

Fonte: Lubrax Petrobras

CAPÍTULO 3:

ESTUDO EXPERIMENTAL

Nesse capítulo iremos abordar os materiais e métodos utilizados para a elaboração do estudo experimental da análise de eficiência na transferência de calor e massa em um radiador de um transformador de potência de 69KVA, utilizando para tanto resfriamento evaporativo.

3.1 INTRODUÇÃO

A dissipação do calor gerado pelos transformadores é o foco principal desse estudo, pois é através da otimização desse processo que vislumbramos melhorar a vida útil, bem como a disponibilidade dos transformadores. A falha no processo de refrigeração dos transformadores causa principalmente uma alteração nas características físico-químicas do óleo isolante, o que pode provocar sérios danos a parte ativa do transformador, visto que a principal função do óleo isolante é de manter o núcleo e enrolamentos em condições satisfatórias de funcionamento.

A técnica comumente utilizada para manutenção preventiva dos transformadores é a análise do óleo isolante, cujo objetivo é analisar as condições de trabalho a que o núcleo e enrolamentos estão sendo submetidos, através da composição e temperatura que o óleo se encontra. É uma técnica simples e muito viável, dado a simplicidade na coleta do óleo, o baixo custo na análise e capacidade de identificar diversos problemas internos.

Buscas por novas técnicas de refrigeração dos radiadores visa otimizar a dissipação de calor que o óleo absorveu no núcleo do radiador. Essas melhorias estão diretamente ligadas ao custo de manutenção e a redução do tempo para manutenção, cuja viabilidade econômica é bastante significativa para as empresas concessionárias e distribuidoras de energia elétrica.

Nessa pesquisa foi estudada a capacidade de dissipação de calor de um sistema de resfriamento evaporativo que utiliza um conjunto de bicos pulverizadores de água, instalados na parte frontal dos ventiladores existentes nos transformadores, direcionados no sentido da corrente de ar, proporcionando uma névoa de água que irá se evaporar rapidamente, provocando o efeito de refrigeração. Foi analisada diversas configurações, onde analisamos vários parâmetros (tais como: pressão de borrifamento, vazão de água, posição dos bicos, quantidade de bicos, velocidade do vento, entre outros), buscando

atingir um ponto ótimo, onde se otimizasse o consumo de água e a capacidade de resfriamento do conjunto, visando sempre a eficiência energética.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os principais equipamentos utilizados para a montagem da bancada experimental e do sistema de aquisição de dados, serão descritos a seguir. A montagem geral do sistema pode ser vista na figura abaixo.



Figura 3.1: Composição geral da bancada experimental. 1- Reservatório de óleo que simula o núcleo do transformador; 2- Radiador de um transformador de 69 kV; 3- ventilador; 4- Sistema de aspersão de água; 5- bomba centrífuga.



Figura 3.2: Sistema de monitoramento e aquisição de dados. 1- Data logger; 2- Monitoramento do sistema através do LabView; 3- Inversores de frequência do ventilador e da bomba.

3.2.1 RESERVATÓRIO DE ÓLEO

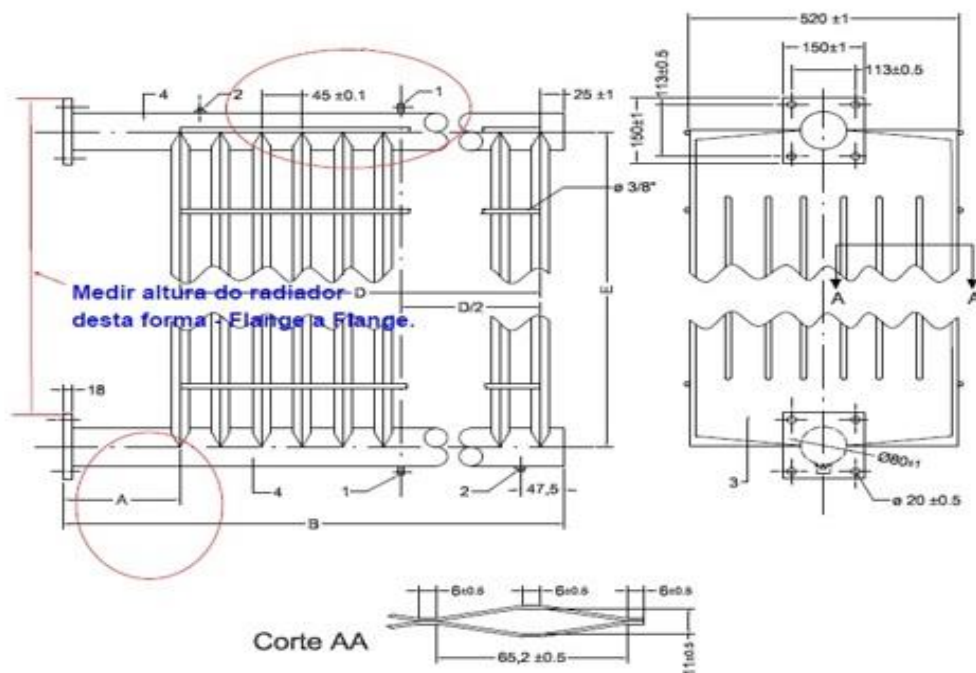
O reservatório de óleo foi confeccionado em chapa de aço inox, com 500 litros de volume, é equipado com termostato, contactor e resistências elétricas que somam uma potência de 24 kW em 8 estágios de carga, que simula condições reais de carga de um transformador de 69 kVA. O reservatório será acoplado ao radiador, para emular funcionamento pleno de um transformador, provocando a circulação do óleo do tanque aquecido para o bloco de aletas do radiador. Inicialmente o reservatório foi preenchido com água da rede de distribuição local, pois o óleo isolante ainda não havia chegado.



Figura 3.3: Reservatório de óleo acoplado ao radiador.

3.2.2 RADIADOR

Trocador de calor aletado com ventilador acoplado. Será circulado por óleo quente, aquecido pelas resistências do tanque, simulando cargas reais dos transformadores. O radiador é do tipo painel, com 17 aletas de aço galvanizado, ligados ao tanque por tubos e flange do mesmo material, sendo todo pintado com tinta resistente a corrosão. As dimensões dos seus componentes podem ser vistas abaixo:



COTA A = 80,00 mm
 COTA B = 825,00 mm
 COTA C = 45,00 mm
 COTA D = 720,00 mm
 COTA E = 1.000,00 mm
 Largura do elemento = 520 mm
 Espessura da chapa dos elementos = 1,20 mm

Figura 3.4: Dimensões do bloco aletado do radiador. Fonte: Marangoni Indústria elétrica.

3.2.3 VENTILADOR DO RADIADOR

O ventilador é responsável por provocar uma ventilação forçada no bloco aletado do radiador, conseguindo com isso um resfriamento por convecção forçada. Esse equipamento é posicionado no centro do radiador. O sistema auxiliar de arrefecimento será instalado a montante desse, a fim de provocar uma névoa evaporativa em todo o aletado do radiador. Suas principais características e dimensões podem ser verificadas na figura abaixo:

	Pos.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ângulo das Pás	°	20	25	30	38	20	25	30	38	20	25	30	20	25	30
Vazão Livre	m³/s	1,75	2,09	2,34	2,69	1,75	2,09	2,34	2,69	2,40	2,85	3,20	2,40	2,85	3,20
Potência	CV	0,16	0,25	0,33	0,50	0,16	0,25	0,33	0,50	0,50	0,75	0,75	0,50	0,75	0,75
Rotação Aproximada	RPM	850								1150					
Tensão	V	220/380				440				220/380				440	
Frequência	HZ	60				60				60				60	
IP	A	2,86/1,65	4,9/2,8	7,0/4,0	11,8/6,8	1,43	2,5	3,5	5,9	9,5/5,5	11,5/6,6	11,5/6,6	4,8	6,8	6,8
IN	A	1,3/0,75	1,25/0,7	2,0/1,15	2,8/1,6	0,65	0,63	1,0	1,4	2,15/1,24	2,8/1,6	2,8/1,6	1,1	1,4	1,4
Cota "A"	mm	380	403	403	420	380	403	403	420	403	403	403	403	403	403
Nível de Ruído	dB (A)	53,0	56,0	58,0	62,0	53,0	56,0	58,0	62,0	61,5	63,0	65,0	61,5	63,0	65,0
Peso Líquido	Kg	19	23	23	29	19	23	23	29	23	23	23	23	23	23
EVR	VZ nº	0005	0004	0003	0002	0005	0004	0003	0002	0009	0010	0014	0009	0010	0014

MOTOR: Isolamento : Classe "B". Pintado na cor Munsell N 6,5. *Grau de Proteção: Recomendamos: - para instalação horizontal = IP 55 - para instalação vertical = IPW 55 HÉLICE: Cubo e Pás = Alumínio pintados na cor Munsell N 6,5. Diâmetro nominal 595 mm / 3 pás / Sentido Anti-horário CARCAÇA: Em aço zincado a fogo conforme a norma NBR 6323 Espaçamento entre arames: 24mm. Notas: 1- Os valores de nível de ruído são orientativos, Representam a média de 5 leituras obtidas a 2 m, com descarga livre, fluxo de ar na horizontal e não incluem nenhuma correção. 2- Os valores das correntes IP e IN são válidos para motores EBERLE	
--	--

Figura 3.5: Dados característicos do ventilador do radiador. Fonte: Marangoni Indústria elétrica.

3.2.4 BOMBA CENTRÍFUGA

A bomba será utilizada no sistema de pulverização de água no radiador do transformador, terá a função de controlar a pressão e a vazão de borrifamento. Será controlada pelo o inversor de frequência que irá variar sua rotação de acordo com a demanda do transformador, que será medida pela temperatura do topo do óleo. É uma bomba centrífuga de monoestágio, com rotor de alumínio, alimentação trifásica e 60Hz, rotação de 3500 rpm, ½ CV de potência, vazão de 3,3 m³/h e altura manométrica de 20 m.c.a.



Figura 3.6: Bomba centrífuga para o sistema de pulverização. Fonte: Thebe Bombas Hidráulicas.

3.2.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE DE DADOS

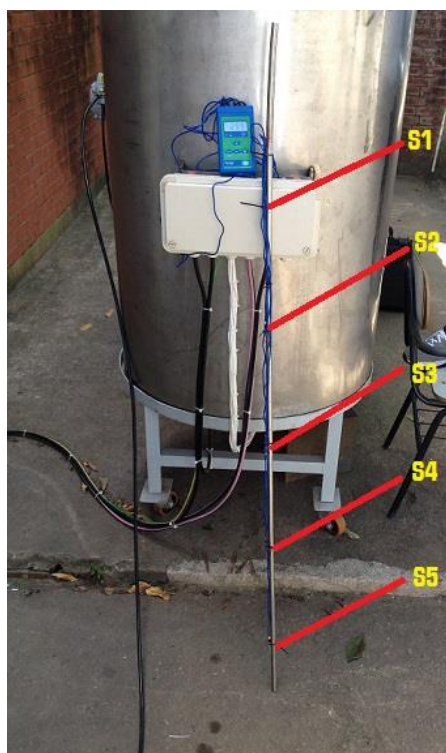
Tal sistema dedicar-se-á à aquisição e armazenamento de dados para monitoramento e avaliação de rendimento, temperaturas do sistema, condições atmosféricas, dentre outras. A aquisição e o armazenamento dos sinais coletados pelos sensores, bem como a saída de sinal para acionamento dos inversores, é feito pelo Data Logger da National Instruments, o CompactDAQ, que oferece uma plataforma portátil para aquisição, armazenamento e monitoramento de dados, diretamente no computador via USB. Tal equipamento dispõe de um chassi de 4 slots para módulos E/S, cada módulo é composto de 20 canais analógicos de entrada para tensão 10V; 8 canais analógicos de entrada para corrente 20mA; 24 canais de entrada para RTD a quatro fios; 8 canais analógicos de saída para tensão 10V; e 8 canais de saída para acionamento de relé 60VDC (1A).



Figura 3.7: Módulo de aquisição de dados. Fonte: National Instruments.



Figura 3.8: Inversores de frequência do ventilador e bomba.



(a)



(b)

Figura 3.9: Sensores de temperatura. (a) medem a temperatura do óleo dentro do tanque, (b) medem a temperatura do óleo na entrada e saída do radiador.

3.2.6 ANALISADOR DE ENERGIA

O analisador de energia tem a função de medir algumas grandezas elétricas e o consumo energético do sistema. É essencial para o estudo da eficiência do sistema de arrefecimento do transformador.



Figura 3.10: Analisador de energia.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A fase inicial consistiu na montagem e preparação da bancada e do sistema de aquisição de dados. A bancada composta por tanque de óleo, radiador, ventilador e bomba, foi montada e testada para evitar o máximo de vazamento possível, principalmente na junção entre os flanges do tanque e do radiador. Na fase seguinte preparamos o sistema de aquisição de dados para fazer o controle automático das variáveis do sistema, utilizando uma programação no software LabView (figura 3.11). Com o sistema de aquisição de dados pronto e controle funcionando, partimos para a elaboração do sistema de aspersão de água, onde foi testado várias soluções. Inicialmente foi utilizada canos de PVC, com distribuição de borrifamento ao longo do radiador. Foram

feitos furos de vários diâmetros (de 2 a 0,5 mm) nos canos, afim de encontrar a melhor forma de provocar a pulverização de água no aletado do radiador (Figura 3.12). Esse sistema de aspersão foi reprovado, pois desperdiçava-se bastante água, e mesmo o menor furo, de 0,5 mm de diâmetro, não conseguiu a pulverização ideal para abrir a névoa evaporativa no fluxo de ar do ventilador.

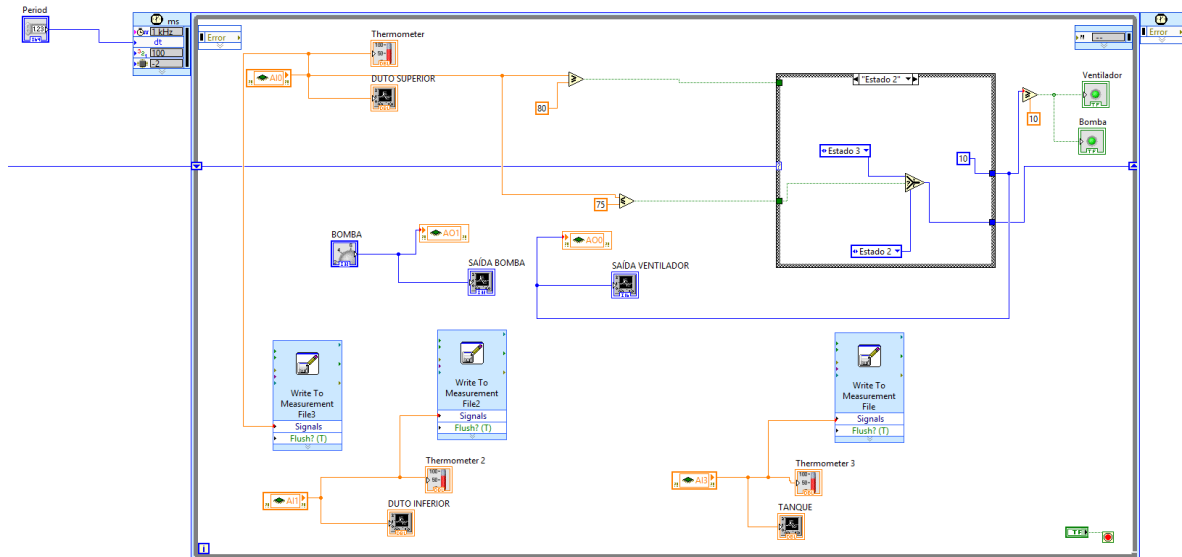


Figura 3.11: Programação no LabView do sistema de controle.

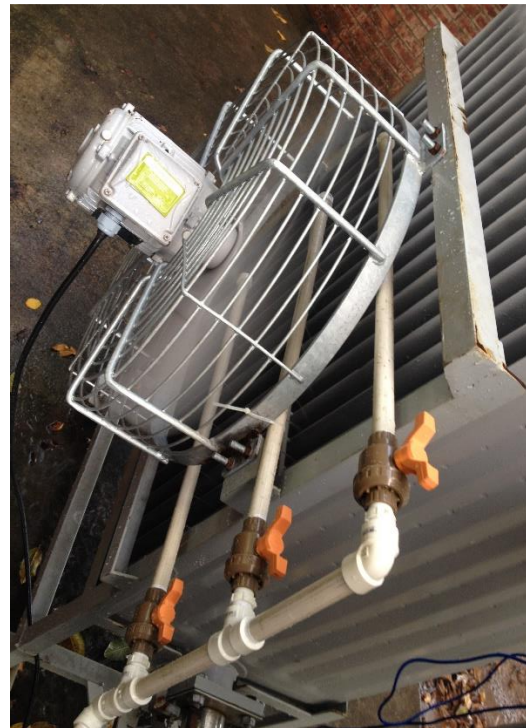


Figura 3.12: Sistema de aspersão utilizando canos de PVC.

Em seguida foi testado bicos metálicos com aspersor de 1 mm de diâmetro, essa solução também foi reprovada pelo desperdício de água (ver figura 3.13). Após essas tentativas sem sucesso, foi pensado um sistema que provocasse uma perda de pressão suficiente para aumentar a velocidade do borrifamento, almejando a pulverização da água e a formação da névoa. Foram utilizados tubos capilares de 1 mm de diâmetro (ver figura 3.14). O desperdício de água e a pulverização foram melhorados significativamente, mas ainda não era o ideal para o sistema de resfriamento evaporativo proposto, que tinha como meta a maximização do poder frigorífico com a minimização do consumo de água.

Após todos esses testes, passamos a focar na busca de bicos que pudessem ser instalados no sistema e tivessem a pulverização correta com a formação de um leque de água que proporcionasse a rápida evaporação no fluxo de ar do ventilador. Foram adquiridos vários tipos de bicos (ver figura 3.15), cada um foi testado e analisado a vazão de borrifamento e a pressão requerida para aspersão de água em forma de leque. Então foi selecionado o bico que melhor apresentou o leque de água, capaz de produzir a névoa evaporativa requerido pelo o sistema (ver figura 3.16).



Figura 3.13: Bicos metálicos utilizados no sistema de pulverização.



Figura 3.14: Sistema de aspersão utilizando tubos capilares.

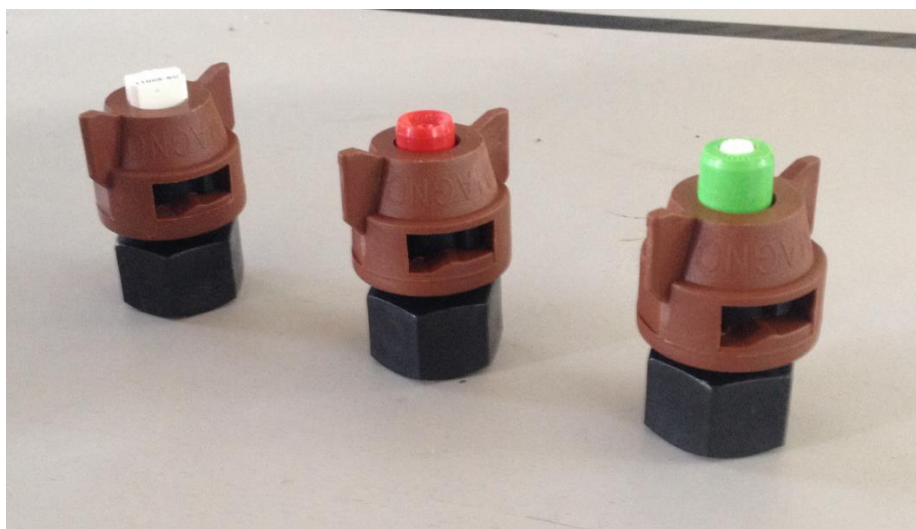


Figura 3.15: Tipos de bicos testados para o sistema de aspersão de água no radiador.



Figura 3.16: Bico selecionado para compor o sistema final de resfriamento evaporativo do transformador de força.

A próxima fase foi analisar a melhor posição do (s) bicos (s) entorno do ventilador, para que a aspersão da névoa de água fosse direcionada para as partes mais quente do aletado do radiador, com isso o arrefecimento do mesmo seria otimizado. Para tanto foi utilizado um termo visor infravermelho, que permitiu a exata posição dos pontos mais quentes (ver figura 3.17). Com isso, o sistema de arrefecimento estava quase pronto para as fases de testes, faltando apenas analisar a quantidade de bicos a serem instalados, para proporcionar um equilíbrio entre resfriamento e consumo de água (ver figura 3.18).

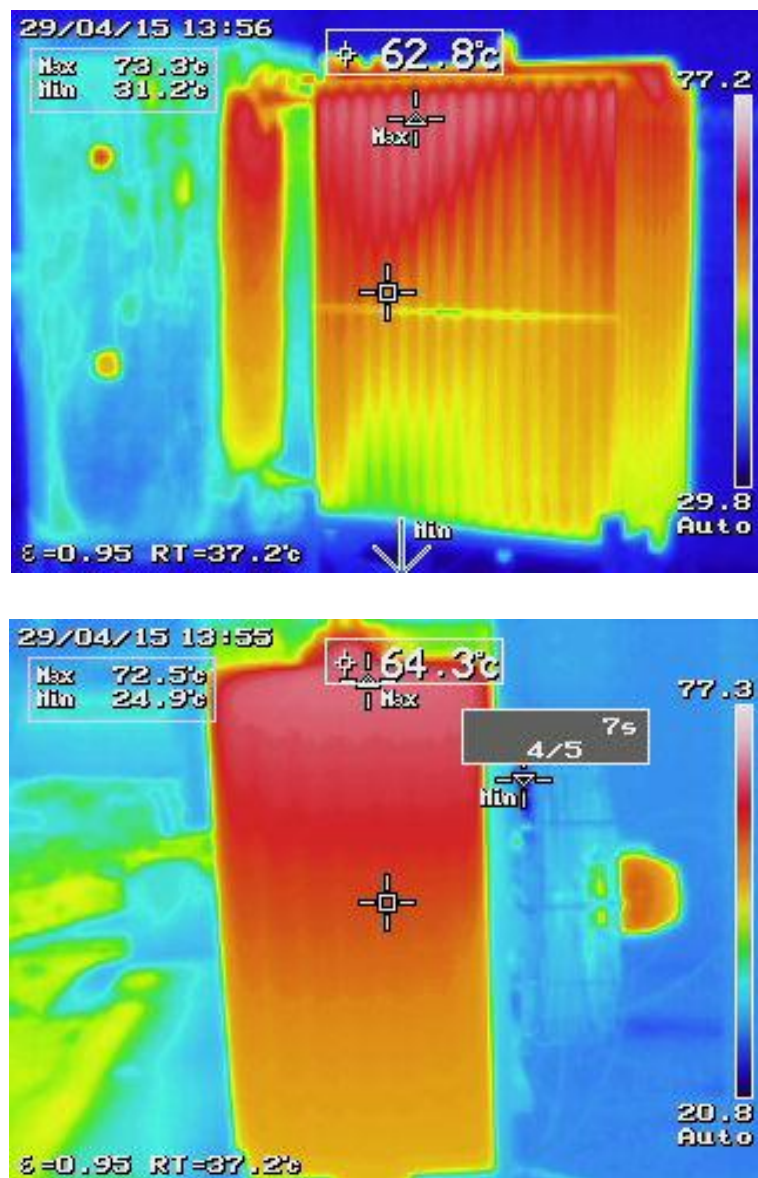


Figura 3.17: Foto infravermelho do radiador para identificação dos pontos de maior temperatura.

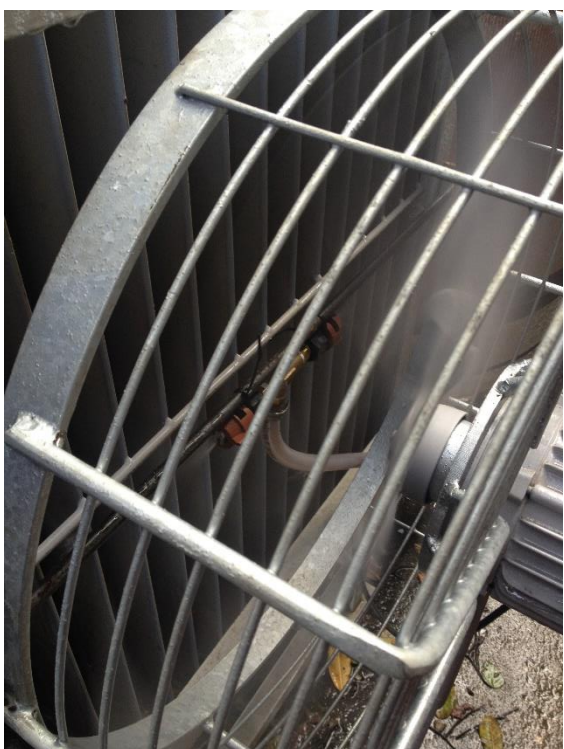
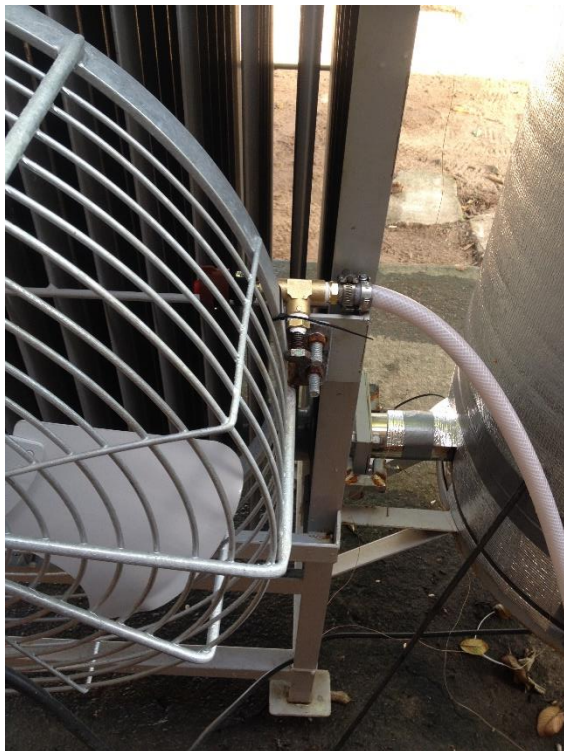


Figura 3.18: Análise do posicionamento e quantidade dos bicos de pulverização de água.

O ponto ótimo foi atingido com o posicionamento de dois bicos na parte central do ventilador com borrifamento para cima, podendo selecionar apenas um bico, dependendo da demanda do transformador, nessa configuração conseguimos otimizar o consumo de água. Entretanto nos primeiros testes os bicos entupiam com facilidade,

devido ao grau de impurezas contida na água. Para solucionar o problema, foi instalado um filtro fino antes dos bicos (ver figura 3.19).



Figura 3.19: Filtro fino para evitar o entupimento dos bicos.

Após decidido a configuração final do sistema, a bancada estava pronta para a etapa de testes e coleta de dados, para posterior análise dos resultados.

Os procedimentos dos testes eram bastantes simples, consistia basicamente em ligar as resistências do reservatório de óleo, que inicialmente foi preenchido com água, para aquecer até uma determinada temperatura, essa seria baseada em condições reais de funcionamento de transformadores de força, onde a temperatura do topo do óleo pode valores máximos de até 105°C , dependendo da classe do transformador. Após atingir a temperatura de setpoint (geralmente fixada em 80°C), preestabelecida no software de controle, o sistema de resfriamento era acionado, primeiramente a ventilação forçada sem o sistema evaporativo, onde se coletava a curva de resfriamento versus tempo, para reduzir a temperatura da água em 10°C . Em seguida o sistema de resfriamento era desligado e a água voltava a aquecer até a temperatura de setpoint, onde novamente seria acionado o sistema de resfriamento, sendo que nesse momento o sistema auxiliar de arrefecimento era acionado junto ao ventilador, e então coletava-se a curva de resfriamento. No final obtinha-se uma curva que comparava a eficiência dos dois métodos (com e sem a presença do sistema auxiliar de arrefecimento).

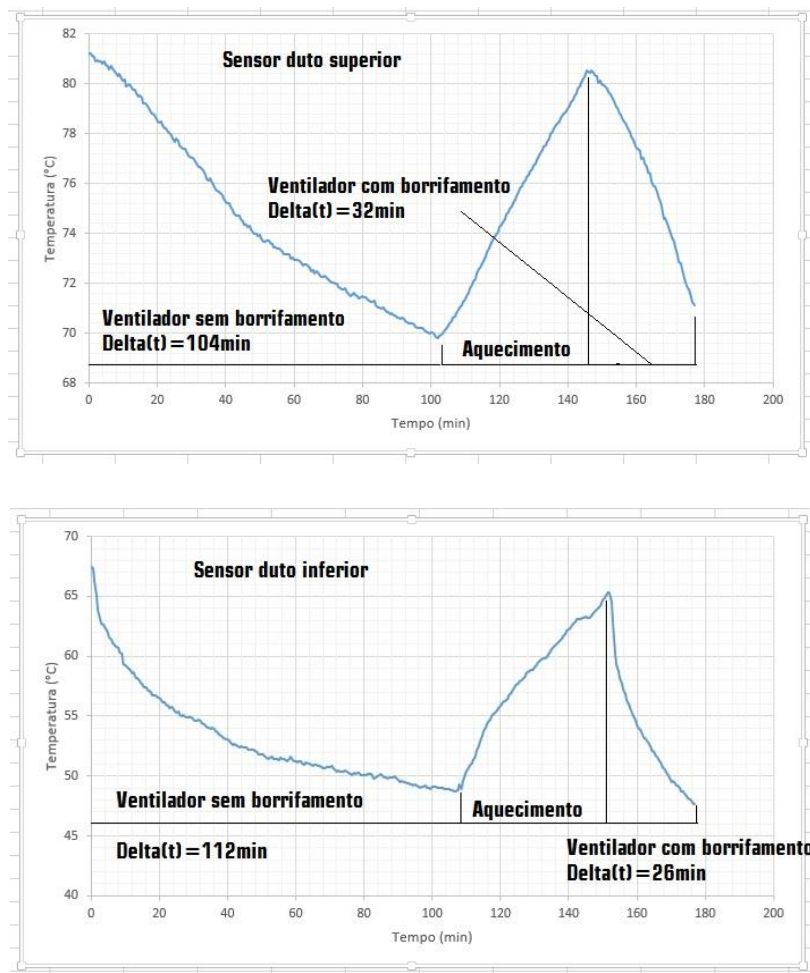


Figura 3.20: Curva de resfriamento do sistema de arrefecimento do transformador.

Após o primeiro resultado, mostrado na figura 3.20, que foi utilizando os bicos metálicos que tinham um desperdício muita grande de água, passou-se a fazer os testes na configuração final do sistema, analisando sua eficiência. Fez-se vários testes em diversas combinações das variáveis do sistema (tais como velocidade e pressão de borrifamento, vazão de água, consumo de energia, velocidade do ventilador), onde foi possível analisar a condição ótima de funcionamento do sistema auxiliar de arrefecimento, vislumbrando a configuração que maximizasse o resfriamento do transformador e minimizasse o consumo de água e energia.

CAPÍTULO 4:

RESULTADO E ANÁLISES

Nesse capítulo são expostos os resultados obtidos nos diversos testes feitos na bancada experimental. Será feita uma análise comparativa entre os dois métodos de resfriamento do transformador (com e sem o sistema auxiliar de arrefecimento), para que possa aferir o potencial de resfriamento do sistema evaporativo proposto.

4.1 RESULTADOS DOS TESTE DE BANCADA

Foram realizados diversos testes na bancada, alterando-se as variáveis de controle em busca da melhor configuração para o sistema, com o objetivo de maximizar a eficiência energética. Os resultados expostos abaixo são obtidos a partir de testes que utilizaram água como fluido de arrefecimento do transformador, pois o óleo isolante não havia chegado. A configuração de cada teste foi a seguinte:

TESTE – 1: Realizado em 30/07/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e $UR = 76\%$

Nesse teste foi utilizado dois bicos pulverizadores, localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para a lateral. O ventilador e bomba permaneceram a 100% da sua rotação. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **54 min**, o consumo de água foi de **0,74 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,273 kWh**. (Figura 4.1)

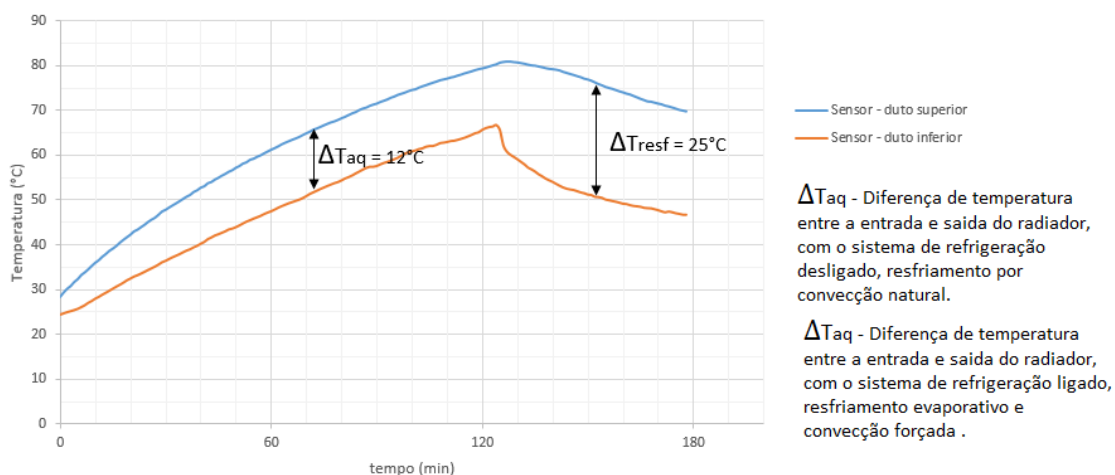


Figura 4.1: Resultado do Teste 1.

TESTE – 2: Realizado em 31/07/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 24^{\circ}\text{C}$ e $UR = 78\%$

Nesse teste foi utilizado dois bicos pulverizadores, localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para a lateral. O ventilador permaneceu a 100% da sua rotação e a bomba variou sua rotação de acordo com a queda de temperatura. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **71 min**, o consumo de água foi de **0,44 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,257 kWh**. (Figura 4.2)

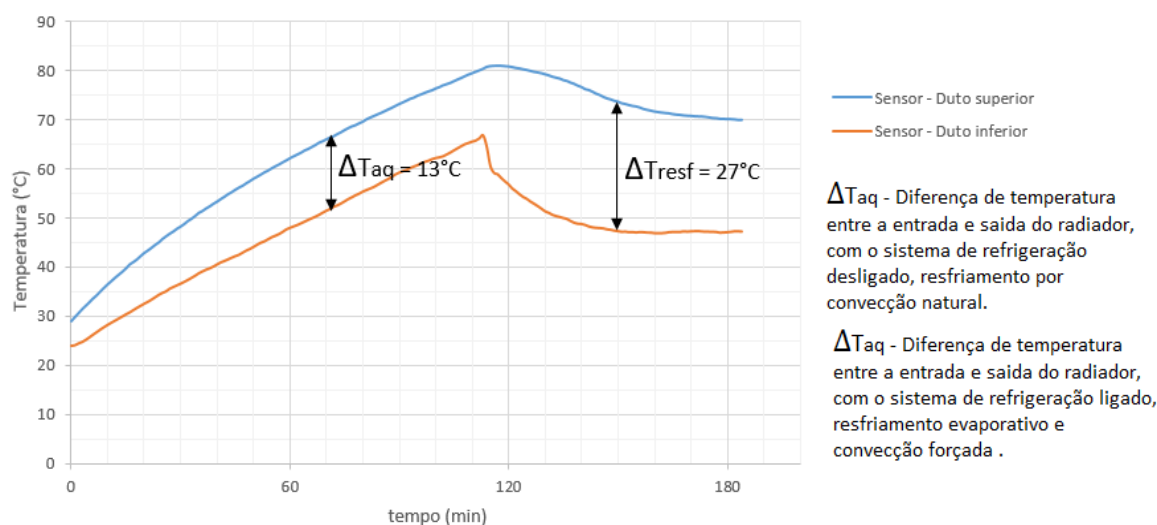


Figura 4.2: Resultado do Teste 2.

TESTE – 3: Realizado em 03/08/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e $UR = 74\%$

Nesse teste foi utilizado dois bicos pulverizadores, localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para a lateral. O ventilador permaneceu a 100% da sua rotação, sendo que a bomba foi mantida a uma rotação fixa de 60% de sua capacidade. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **64 min**, o consumo de água foi de **0,33 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,139 kWh**. (Figura 4.3)

TESTE – 4: Realizado em 06/08/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 26^{\circ}\text{C}$ e $UR = 69\%$

Nesse teste foi utilizado um bico pulverizador, localizados na lateral do ventilador com direção de borrifamento para o centro. O ventilador e bomba permaneceram a 100% da sua rotação. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho

de 80°C para 70°C foi de **62 min**, o consumo de água foi de **0,42 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,46 kWh**. (Figura 4.4)

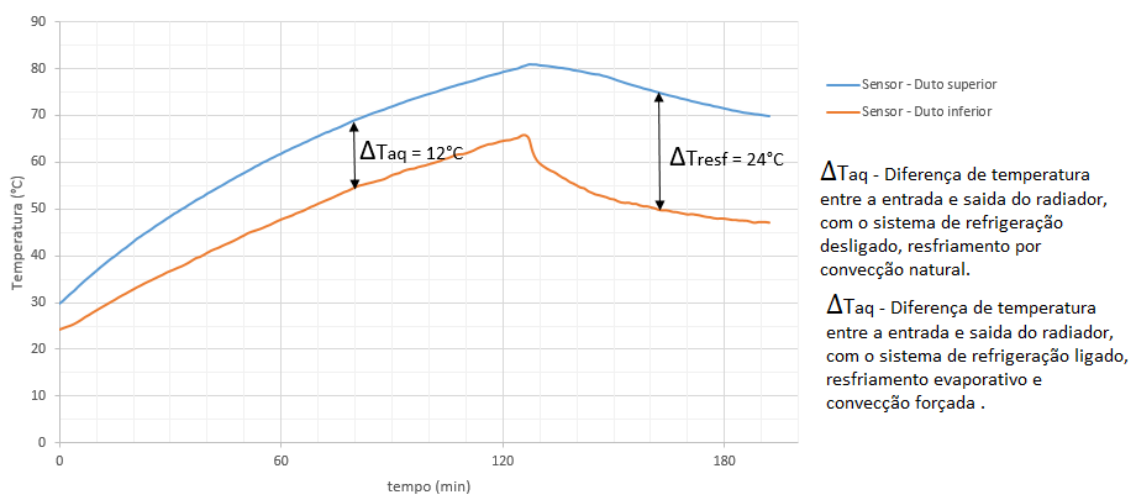


Figura 4.3: Resultado do Teste 3.

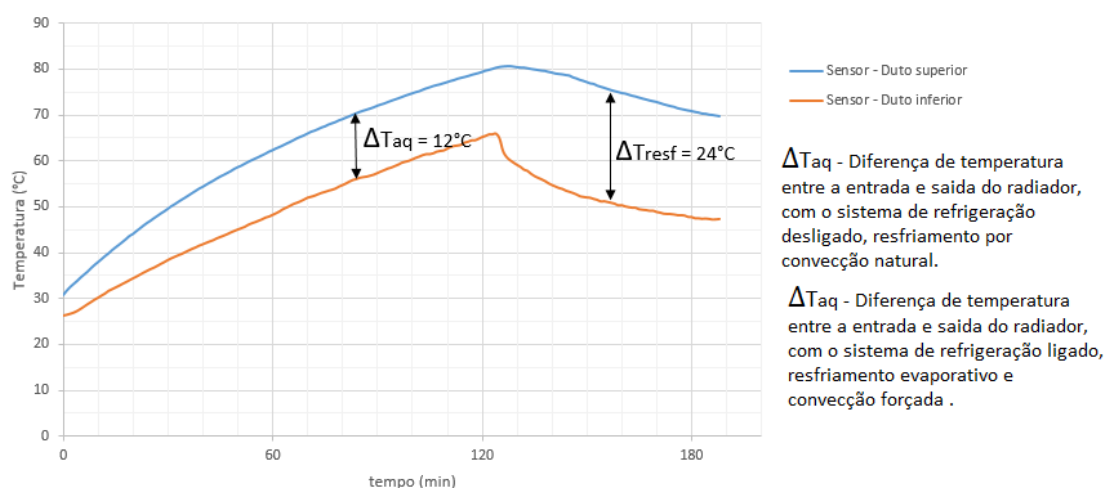


Figura 4.4: Resultado do Teste 4.

TESTE – 5: Realizado em 07/08/2015, início as 9:00, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e UR = 62%

Nesse teste foi utilizado um bico pulverizador, localizados na lateral do ventilador com direção de borrifamento para o centro. O ventilador a 100% da sua rotação e bomba a 60%. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **66 min**, o consumo de água foi de **0,28 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,135 kWh**. (Figura 4.5)

TESTE – 6: Realizado em 13/08/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 26^{\circ}\text{C}$ e $UR = 74\%$

Nesse teste foi utilizado um bico pulverizador, localizados na lateral do ventilador com direção de borrifamento para o centro. O ventilador a 80% da sua rotação e bomba a 100%. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **77 min**, o consumo de água foi de **0,42 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,28 kWh**. (Figura 4.6)

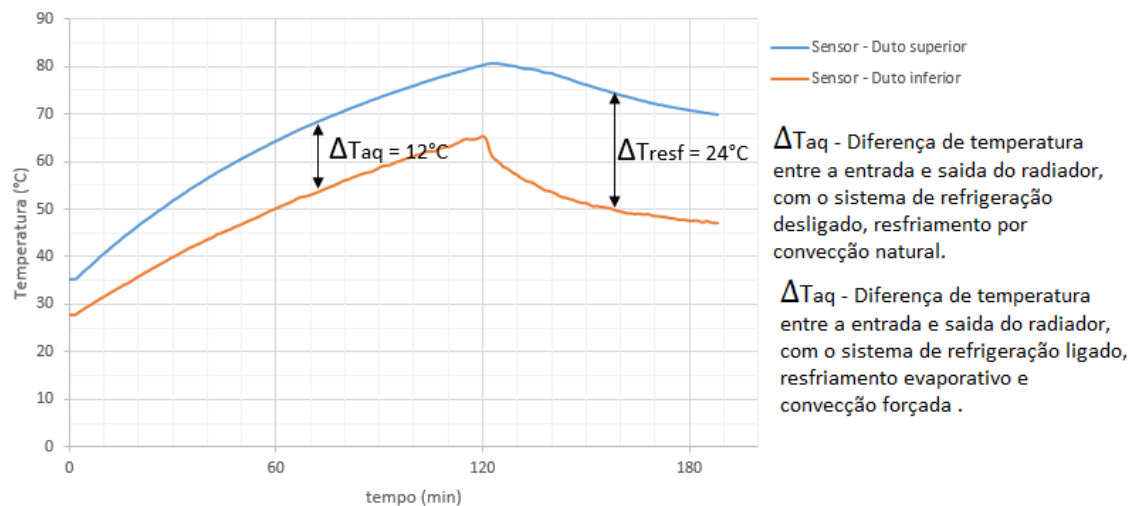


Figura 4.5: Resultado do Teste 5.

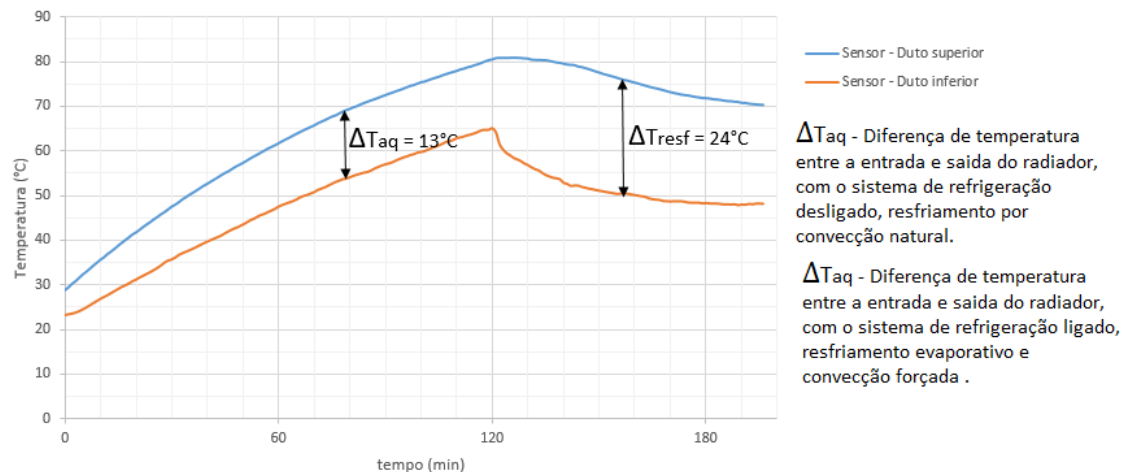


Figura 4.6: Resultado Teste 6.

TESTE – 7: Realizado em 14/08/2015, início as 9:00, $T_{amb} = 27^{\circ}\text{C}$ e $UR = 75\%$

Nesse teste foi utilizado um bico pulverizador, localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para cima. O ventilador e bomba permaneceram a 100% da sua rotação. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho

de 80°C para 70°C foi de **52 min**, o consumo de água foi de **0,42 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **1,192 kWh**. (Figura 4.7)

TESTE – 8: Realizado em 17/08/2015, início as 8:30, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e $UR = 65\%$

Nesse teste foi utilizado um bico pulverizador, localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para cima. O ventilador a 100% da sua rotação e bomba a 60%. Nessas condições o tempo para resfriar a temperatura do fluido de trabalho de 80°C para 70°C foi de **55 min**, o consumo de água foi de **0,28 L/min** e o consumo de energia elétrica do conjunto ventilador + bomba foi de **0,927 kWh**. (Figura 4.8)

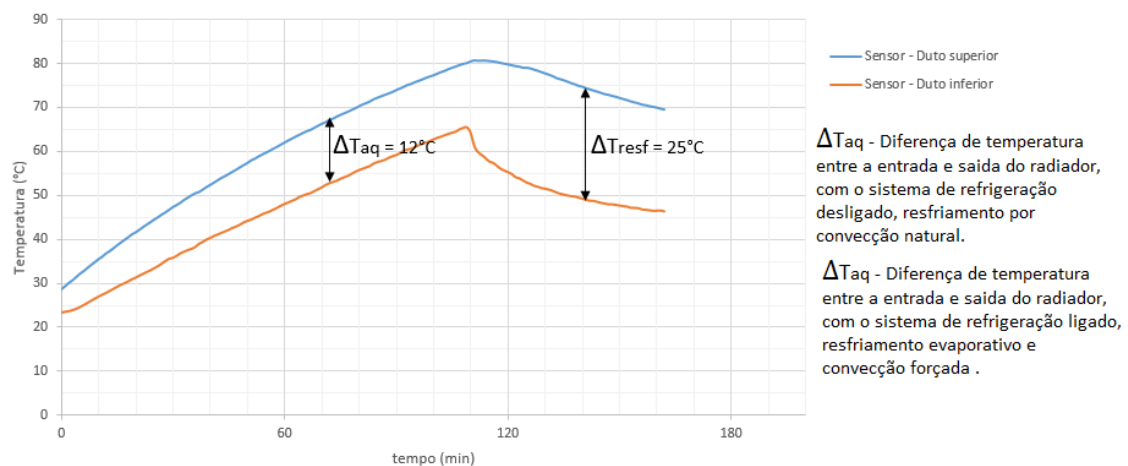


Figura 4.7: Resultado do Teste 7.

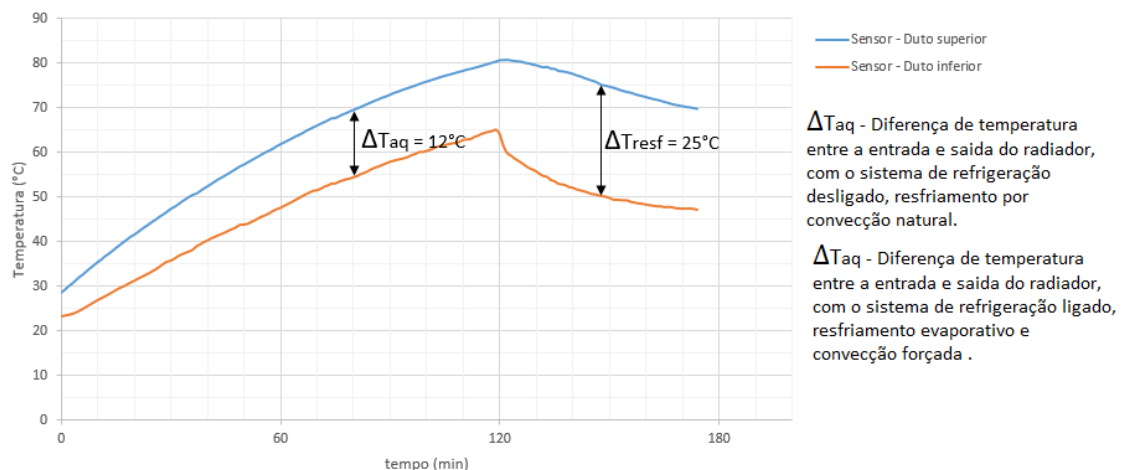


Figura 4.8: Resultado Teste 8.

TESTE – 9: Realizado em 27/08/2015, início as 7:30, $T_{amb} = 26^{\circ}\text{C}$ e UR = 69%

O sistema foi aquecido por 2 horas, em seguida o ventilador foi acionado em plena carga durante 3 horas, com o sistema de arrefecimento desligado. Verificou-se a capacidade de resfriamento somente por ventilação forçada. O bico estava localizado na parte central do ventilador com borrifamento para cima. (Figura 4.9)

TESTE – 10: Realizado em 28/08/2015, início as 7:30, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e UR = 62%

O sistema foi aquecido por 2 horas, em seguida o ventilador e a bomba foram acionados em plena carga durante 3 horas. Verificou-se a capacidade de resfriamento do conjunto ventilação + borrifamento. O bico estava localizado na parte central do ventilador com borrifamento para cima. (Figura 4.10)

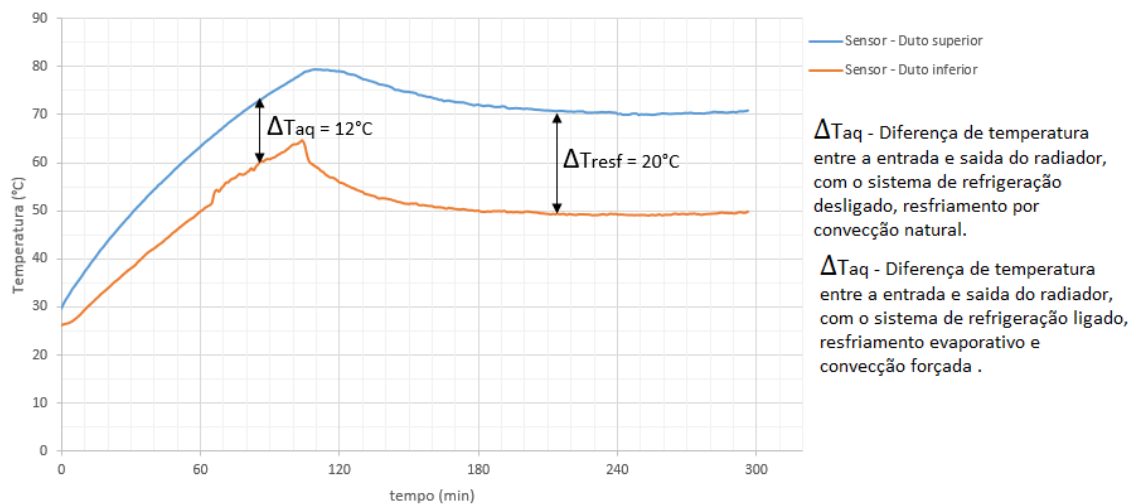


Figura 4.9: Resultado do Teste 9.

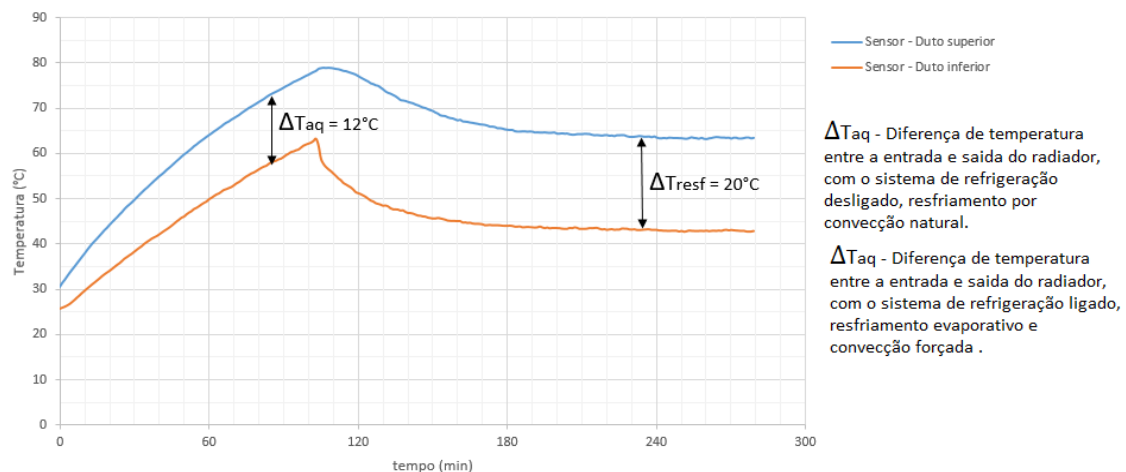


Figura 4.10: Resultado do Teste 10.

Os próximos resultados foram realizados utilizando óleo mineral com fluido de trabalho.

TESTE – 11: Realizado em 24/02/2016, início as 14:30, $T_{amb} = 30^{\circ}\text{C}$ e $UR = 67\%$

O sistema foi aquecido até 80°C , o ventilador foi acionado em plena carga durante 1 hora, em seguida a bomba para borrifamento de água foi acionada em plena carga por mais 1 hora. Foram utilizados dois bicos de pulverização localizados na parte central do ventilador, direcionados para as partes mais quente do radiador. (Figura 4.11)

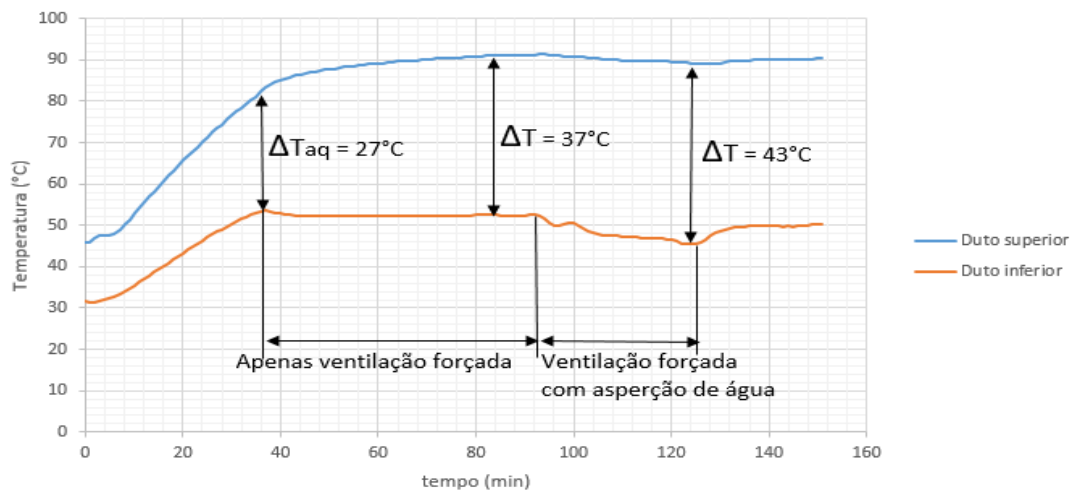


Figura 4.11: Resultado do Teste 11.

TESTE – 12: Realizado em 25/02/2016, início as 08:30, $T_{amb} = 28^{\circ}\text{C}$ e $UR = 74\%$

O sistema foi aquecido até 80°C , em seguida o ventilador e a bomba foram acionados em plena carga durante 2 horas. Foram utilizados dois bicos de pulverização localizados na parte central do ventilador, direcionados para as partes mais quente do radiador. (Figura 4.12)

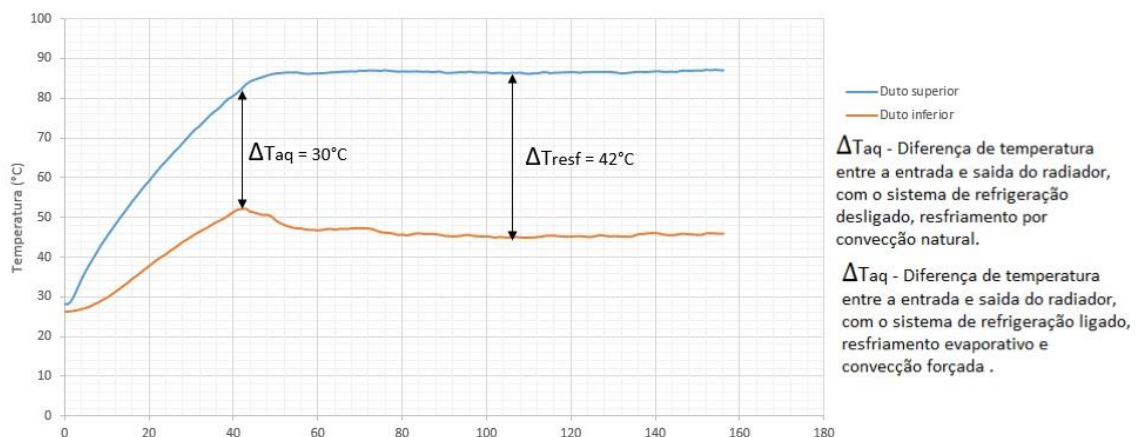


Figura 4.12: Resultado do Teste 12.

4.2 ANÁLISES

A análise dos resultados dos testes de 1 a 3 mostra que, a variação da rotação da bomba com a queda de temperatura, não é uma boa alternativa para a otimização do consumo de água, visto que seu consumo foi maior do que aquele utilizando rotação fixa a 60% da capacidade da bomba, além de o tempo de resfriamento e o consumo elétrico também serem maiores.

A análise dos resultados dos testes de 4 a 8 mostra que, a utilização de um bico ao invés de dois é bastante proveitosa para otimização do consumo de água. Além disso, foi verificado que a melhor posição para o bico pulverizador é na parte central do ventilador com borrifamento para cima, nessas condições a potência de resfriamento se igualou com aquela que utilizava dois bicos com borrifamento para lateral, sendo que o consumo de água e de energia foram reduzidos significativamente. Foi verificado também que a variação de rotação do ventilador não produz resultados significativos para redução de consumo de energia.

Os testes 9 e 10, foram realizados com o objetivo de se mensurar o limite de resfriamento do sistema ao atingir o regime permanente, como pode ser observado nas figuras 4.9 e 4.10. Utilizando a ventilação forçada com sistema de resfriamento desligado, o regime permanente é atingido a uma temperatura de aproximadamente 70°C, já com o sistema evaporativo ligado essa temperatura cai para 63°C.

Os testes 11 e 12, onde se utilizou óleo mineral como fluido de trabalho, mostraram um comportamento diferente dos testes de 1 a 10, onde se utilizou água como fluido de trabalho. A diferença das temperaturas de entra e saída (ΔT) aumentou bastante, isso já era esperado, visto o calor específico do óleo isolante ($C_p = 2,22 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$) ser aproximadamente a metade do da água ($C_p = 4,20 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$). Entretanto o sistema não conseguiu diminuir a temperatura do topo do óleo, a qual se manteve praticamente constante durante o tempo que o sistema de arrefecimento estava ligado.

Analizando todos os resultados obtidos nos testes descritos acima, pode-se concluir que a melhor configuração do sistema, onde o consumo energético é otimizado, é aquela composta por um bico ou dois bicos pulverizadores localizados no centro do ventilador com direção de borrifamento para cima, a bomba sendo acionada com rotação fixa a 60% da sua rotação máxima e o ventilador a plena carga.

Esse estudo representa o primeiro passo para elaboração de um protótipo de um sistema de resfriamento de transformadores totalmente automático se auto ajustando as condições climáticas, que será utilizado em um transformador de força de uma estação de distribuição de energia elétrica localizada no semiárido brasileiro. O controle da vazão de ar, vazão e pressão da água, nível do tanque de reposição de água, visando o resfriamento ótimo com a maximização do consumo de energia em bombas e ventiladores e minimização de consumo de água, será realizado utilizando estratégias de Controle Inteligente (Lógica Fuzzy e/ou Redes Neurais).

CAPÍTULO 5:

CONCLUSÕES

Considerando os resultados dos testes experimentais realizados na bancada que simula operações reais de um transformador de potência de médio porte, pode se concluir que:

- I. O sistema auxiliar de arrefecimento para transformadores de força proposto nessa pesquisa, se mostrou bastante eficiente. Os testes mostraram que o sistema evaporativo provoca um aumento de 62% na capacidade de transferência de calor no aletado do radiador, quando comparado com o sistema de resfriamento apenas por convecção forçada. Com isso consegue-se reduzir a temperatura do fluido de trabalho rapidamente (10°C em 52 min) e para uma temperatura de regime permanente menor. Como foi visto, com o sistema evaporativo ligado conseguimos diminuir a temperatura do fluido em 17°C, em 70 minutos, já com o mesmo desligado a redução de temperatura chega no máximo a 10°C. Essas conclusões são em cima dos resultados dos testes que utilizaram água como fluido de trabalho.
- II. O comportamento da curva de resfriamento, quando se utilizou óleo mineral como fluido de trabalho, foi um pouco diferente, onde a maior mudança apresentada foi em relação ao ΔT (diferença de temperatura entre a entrada e saída do radiador), onde os valores foram significativamente maiores, entorno de 43°C com o sistema de evaporativo ligado. Entretanto a temperatura do topo do óleo não diminuiu, permaneceu constante com o sistema de arrefecimento ligado.
- III. Além de todos os resultados mostrarem uma eficiência promissora do sistema auxiliar de arrefecimento, outro fato deve ser levado em consideração, todos os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LES) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), localizada em João Pessoa, cidade cuja umidade relativa média no ano chega a 80%, onde a eficiência de sistemas evaporativos é dita como pequena para regiões com umidades tão altas. Sendo assim, quando o sistema for instalado em regiões semiáridas, que é a proposta do projeto, onde a umidade relativa

média no ano chega a 40%, a eficiência do sistema será aumentada em cerca de 50%.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, J. R. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar**. 2003. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.
- CAROSI, G. A. B. **Resfriamento Evaporativo: estudo do potencial de sua aplicação no Brasil**. 2005. 110f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.
- ALONSO, J. S. J.; VIEIRA, C.Y.; MARTÍNEZ, F. J. R. **Análisis teórico de um refrigerador evaporativo indirecto en aire acondicionado**. Anais do III Congresso Ibero-Americano de Ar Condicionado e Refrigeração, São Paulo, 1995. p.169-179.
- BAÊTA, F. C.; SARTOR, V.; FERREIRA, A. S.; CECON, P. R. **Efeito do resfriamento evaporativo e da ventilação forçada no conforto térmico ambiental de verão em maternidades de suínos**. Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola., 1997.
- BASENGE TERMODINÂMICA. **Resfriadores de Ar**. Catálogo técnico, s.d.
- CAMARGO, J. R.; CARDOSO, S.; TRAVELHO, J. S. **Utilização do resfriamento evaporativo para conforto térmico humano em diversas cidades brasileiras**. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2000, Natal, RN, 2000a.
- NATION, J. A. **Evaporative Cooling in Nontraditional Climates**. ASHRAE Transactions, vol. 90, part 1, 1984. p.154-165.
- BECHARA, RICARDO. **Análise de falhas em transformadores de potência**. 2010. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2010.
- SOUZA, D. C. P. S. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de**. 2008. 101f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica e Computação. Goiás, 2008.
- MARQUES, A.P. **Eficiência Energética e Vida Útil de Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo Mineral Isolante**. Dissertação de Mestrado – Escola de

Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2004. 182p.

SANTOS, L.T.B.; OLIVEIRA J., G.F.B.; ZAMBRANO, G.M.V.; MARTINS, H.J.A.; TRINDADE, M.B. **Pesquisa para Diagnóstico de Defeitos na Parte Ativa de Transformadores de Potência.** In: XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Rio de Janeiro, 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 5356 – Transformador de Potência: Especificações** de 08/1993.

Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 5440 – Transformador para redes de distribuição – Características Elétricas e Mecânicas - Padronização.**

WEG, **Manual técnico de transformadores a óleo de até 4000 kVA – Especificações.** Manual 10000892317, Rev.01 – 12/2010.

KOSOW, Irving. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** São Paulo: Ed Globo, 1985.

OLIVEIRA, José Carlos; COGO, João Alberto; ABREU, José Policarpo. **Transformadores: Teoria e Ensaio** – 1ª Edição. São Paulo: Ed. Blucher, 1984.