



Automatização do processo de secagem da parte ativa de transformadores de potencia pelo método HOS - Hot Oil Spray

MOISÉS MANUEL MARTINS DA SILVA

novembro de 2019

AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DA PARTE ATIVA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PELO MÉTODO HOS - HOT OIL SPRAY

Moisés Manuel Martins da Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Moisés Manuel Martins da Silva, Nº 1070167, 1070167@isep.ipp.pt

Orientação científica: Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira, tan@isep.ipp.pt

Coorientação: Rafael Azevedo Castro, rafael.castro@efacec.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

Resumo

A presença de humidade no interior de um transformador constitui um dos principais motivos de envelhecimento prematuro e conseqüentemente a perda de vida útil da máquina. Embora a presença de humidade dentro de um transformador possa ter origens diversas, a sua presença limita-se ao óleo isolante e parte ativa da máquina, existindo uma sistemática migração da humidade entre os isolantes sólidos - papel, cartão, madeiras - e o fluido isolante - óleo dielétrico, em função da temperatura de trabalho.

O método comum e mais habitual de redução do teor de água é através do tratamento do seu óleo isolante, contudo, a médio, longo prazo, este processo não se revela eficaz. De forma a obter melhores resultados e de uma forma mais eficiente, a eliminação da humidade deve ser feita a partir dos isolantes sólidos do transformador que pela sua natureza higroscópica são capazes de reter grandes quantidades de água impregnada.

Neste enquadramento, existe um método eficaz na remoção da humidade da atmosfera interior dos transformadores, chamado de Hot Oil Spray (H.O.S.). Uma técnica que tanto pode ser usada em ambiente industrial, assim como diretamente no local de instalação do transformador.

Com o objetivo de tornar este método ainda mais eficiente e fiável, quer para garantia do bom estado pós intervenção do transformador de potência, assim como um melhoramento substancial na segurança dos técnicos, será proposto na presente dissertação, um sistema automatizado capaz de controlar, monitorizar e fazer um registo fiável das grandezas envolvidas durante todo o processo de secagem.

Assim sendo, a presente dissertação apresenta um sistema desenvolvido com um microcontrolador de baixo custo, Arduino, e com materiais facilmente obtidos atualmente no mercado e criar um simples sistema de monitorização e controlo capaz de:

- Criar uma interface gráfica do sistema a comunicar com um microcontrolador;
- Apresentar em tempo real as principais grandezas envolvidas no processo HOS na interface gráfica criada;
- Fazer o registo automático dessas grandezas num cartão de memória, numa base temporal parametrizável.

Este trabalho foi baseado num processo de secagem já implementado e amplamente desenvolvido na EFACEC e em que o registo das variáveis de controlo, nomeadamente, temperaturas, pressão, vácuo e quantidade de água, são ainda nos dias de hoje registados manualmente em folhas de papel por um operador.

Este sistema foi instalado e validado com sucesso numa das máquinas de secagem instalada na fábrica da EFACEC, e usado na secagem de um transformador de potência, tendo sido registados todos os valores que foram depois usados no relatório final de reparação enviado ao cliente.

Abstract

The presence of moisture inside a transformer is one of the main reasons for premature aging and consequently the loss of useful life of the machine. Although the presence of moisture inside a transformer can have diverse origins, its presence is limited to the insulating oil and active part of the machine, where there's a systematic migration of moisture between the solid insulation - paper, cardboard, wood - and the insulating fluid - dielectric oil, depending on the working temperature.

The most usual and common method for reducing the water content is by treating its insulating oil, however, in the medium to long term this process is not effective. In order to obtain better results and in a more efficient way, the moisture elimination must be made from the solid insulators of the transformer which by their hygroscopic nature are able to retain large amounts of impregnated water.

In this embodiment, there is an effective method of removing moisture from the inner atmosphere of the transformers, called Hot Oil Spray (H.O.S.). A technique that can be used both in an industrial environment, as well as directly on site of installation of the power transformer.

With the aim of making this method even more efficient and reliable, both to guarantee the good state after intervention, as well as a substantial improvement in the safety of the technicians, it will be proposed in this dissertation an automated system capable of controlling, monitoring and to reliably record the variables involved, during the entire drying process.

Thus, the present dissertation presents a system developed with a low-cost Arduino microcontroller, and with materials easily obtained today in the market to create a simple monitoring and control system capable of:

- Create a graphical system interface to communicate with the microcontroller;
- Present in real time the main variables involved in the HOS process, in a graphical interface;
- Automatically record these variables into a memory card on a configurable time basis.

This work was based on a drying process already implemented and widely developed at EFACEC and in which the recording of the control variables, namely, temperatures, pressure, vacuum and water quantity are still, until today, manually recorded on sheets of paper by an operator.

This system was successfully installed and validated on one of the EFACEC factory-installed drying machines and used for monitoring the drying of a power transformer and register all values that were then used in the final repair report sent to the customer.

“A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana”

Louis Pasteur

Agradecimentos

A minha dissertação de mestrado não poderia ser realizada sem o importante apoio de muitas pessoas, às quais agradeço eternamente.

Ao Professor Doutor José António Beleza de Carvalho, que, como diretor do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia, sempre se disponibilizou e demonstrou total prontidão em responder às minhas dúvidas no âmbito da minha dissertação de mestrado.

À Professora Doutora Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira, que como minha orientadora, contribuiu sempre com dedicação na ajuda à elaboração da minha dissertação.

Ao Coorientador, Engenheiro Rafael Azevedo de Castro, que tanto como co-orientador, como colega de trabalho e amigo apoiou-me sempre nesta longa caminhada, demonstrando total interesse e empenho em colaborar comigo neste desafio dentro da empresa EFACEC.

À EFACEC, empresa que me acolheu em 2011 para estágio profissional e onde me mantenho a trabalhar até aos dias de hoje, sem ela não seria possível a elaboração deste tipo de projeto.

Aos meus amigos mais próximos, que sempre me apoiaram e motivaram na conclusão desta etapa.

À minha família, essa mesma que foi um pilar em toda esta caminhada. Que me aturam desde sempre e que com muito apoio contribuiu para o sucesso deste projeto.

Por fim e ao mais importante, à minha esposa, minha eterna companheira em todas as lutas, que com o seu apoio incondicional tornou possível um sonho que há muito tento realizar. Ao meu porto de abrigo, agradecer o resto da vida nunca será suficiente.

A todos, o meu muito obrigado.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos do trabalho e âmbito de aplicação	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. O Transformador de Potência	5
2.1. A importância do transformador	5
2.2. O transformador na cadeia da energia elétrica	6
2.3. Conceito básico de fluxo magnético	7
2.4. Parte ativa do transformador	9
2.4.1. O circuito magnético	9
2.4.2. Enrolamentos	11
2.4.3. Regulador de tensão em carga	12
2.4.4. Isolamento	14
2.4.4.1. Isolantes sólidos	15
2.4.4.2. Óleo isolante	17
3. Manutenção de transformadores	21
3.1. Objetivos da manutenção	21
3.2. Envelhecimento	21
3.2.1. Processos de envelhecimento dos isolantes	23
3.2.2. Agentes aceleradores do processo de envelhecimento dos isolantes	23
3.2.3. Lei de Montsinger	24
3.2.4. Considerações térmicas	25
3.3. Práticas de manutenção	26
3.3.1. Manutenção preventiva em transformadores	26
3.3.1.1. Conceitos básicos	26
3.3.1.2. Ensaio de diagnóstico	27
3.3.1.2.1. Medida da resistência de isolamento dos enrolamentos	27
3.3.1.2.2. Medida da relação de transformação	28
3.3.1.2.3. Medida das resistências óhmica dos enrolamentos	28

3.3.1.2.4. Medida do fator de potência/dissipação (tg δ) dos enrolamentos	29
3.3.1.2.5. Medida da corrente de excitação	30
3.3.1.3. Prolongamento da vida útil	31
3.3.1.4. Prevenção de falhas.....	32
3.3.1.5. Comportamento da água	33
3.3.1.6. Efeito das partículas sólidas	33
3.3.2. Manutenção preditiva em transformadores	34
3.3.2.1. Conceitos básicos.....	34
3.3.2.2. Falhas em transformadores	35
3.4. Comportamento em serviço dos óleos isolantes.....	35
3.4.1 Óleos minerais de uso geral	35
3.4.1.1 Processo oxidativo dos óleos minerais isolantes	36
3.4.1.2 Degradação térmica dos óleos minerais	37
3.4.1.3 Extensão da vida útil	38
3.4.1.4 Prevenção de falhas	38
3.4.1.5 Manutenção preditiva.....	39
4. Secagem da parte ativa de transformadores.....	41
4.1. Definição.....	41
4.2. Origem da água nos isolantes	42
4.3. Estado de secagem do transformador	43
4.4. Fenómeno de secagem.....	44
4.5. Os diferentes processos de secagem.....	45
4.6. Coeficiente de difusão dos isolantes.....	47
4.7. Sistema de secagem pelo método H.O.S.	48
4.7.1. Vantagens do sistema Hot Oil Spray.....	48
4.7.2. Pontos críticos do H.O.S.	49
4.7.3. Ensaio preliminares ao transformador pré-secagem.....	49
4.7.4. Modo de procedimento.....	50
4.7.5. Principais características do equipamento.....	50
4.7.6. Processo	50
4.7.7. Preparação.....	51
4.7.8. Arranque do processo	52
4.7.9. Fim do processo	52

4.7.10. Registo de variáveis	52
4.7.11. Implementação do processo	53
4.7.12. Critérios de aceitação	54
4.7.13. Ensaio ao transformador pós-secagem	55
4.7.14. Exemplificação do sistema	56
4.7.15. Equipamentos	57
4.7.15.1. Aquecedor.....	57
4.7.15.2. Bomba de circulação	58
4.7.15.3. Aspersores/Pulverizadores d óleo	59
4.7.15.4. Grupo de vácuo	59
4.7.15.5. Leitores de pressão e temperatura.....	60
5. Solução Técnica Desenvolvida	61
5.1. Definição das variáveis a monitorizar.....	61
5.2. Hardware utilizado	62
5.2.1. Processamento e controlo - Arduino UNO	63
5.2.2. Aquisição de sinais - Sensores de temperatura	65
5.2.3. Aquisição de sinais - Sensor de pressão.....	69
5.2.4. Aquisição de sinais - Sensor ultrassónico	70
5.2.5. Aquisição de sinais - Vácuo	71
5.2.6. Visualização das variáveis - HMI	73
5.2.7. Registo de valores - Data Logging	73
5.2.8. Alimentação do sistema.....	74
5.3. Montagem do protótipo	74
5.3.2. Placa de entradas digitais	75
5.3.3. Placa de entradas analógicas	76
5.4. Desenvolvimento do código e interface	78
5.5. Implementação.....	79
5.5.1. Montagem do sistema	80
5.5.2. Valores registados	82
5.6. Custos da solução	91
5.6.1. Custo dos componentes	91
5.6.2. Benefício económico.....	92
5.7. Análise e interpretação de resultados	93

6. Conclusão	95
6.1. Análises conclusivas	95
6.2. Trabalhos futuros e melhorias	96
Referências Bibliográficas	97
Anexos	99

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Transformador de potência EFACEC (Subestação da REN de Lagoaça)	5
Figura 2.2 - Cadeia da energia elétrica	7
Figura 2.3 - Campo magnético em torno de um condutor	8
Figura 2.4 - Campo magnético em torno de um condutor, induz tensão num segundo condutor	8
Figura 2.5 - Parte ativa de um transformador durante uma descobagem para reparação...	9
Figura 2.6 - Duas bobines aplicadas num núcleo ferromagnético	10
Figura 2.7 - Circuito magnético de um transformador	11
Figura 2.8 - Bobina isolada com papel Kraft (EFACEC, 2018)	12
Figura 2.9 - Regulador em carga Maschinenfabrik Reinhausen Tipo Oiltap M e seu exemplo de instalação num transformador EFACEC	14
Figura 2.10 - Diversas aplicações do papel isolante Kraft (Weidmann Electrical Technology AG)	15
Figura 2.11 - Pormenor de um rolo de papel crepado (Flexfilm)	16
Figura 2.12 - Pormenor de um rolo de papel Nomex (DuPont)	16
Figura 3.1 - Os diferentes tipos de manutenção realizadas em transformadores	21
Figura 3.2 - Longevidade do transformador relacionada diretamente com a vida do papel isolante	22
Figura 3.3 - Envelhecimento dos isolantes (sistema papel-óleo)	23
Figura 3.4 - Curva da vida útil de um transformador em função da temperatura (V.M. Montsinger, 1930)	24
Figura 3.5 - Esperança de vida em função da temperatura	24
Figura 3.6 - Ações de manutenção preventiva em transformadores	26
Figura 3.7 - Exemplo de montagem para um transformador de três enrolamentos	27
Figura 3.8 - Exemplos de alguns grupos de ligação em transformadores trifásicos	27
Figura 3.9 - Exemplo de montagem para um transformador de três enrolamentos	29
Figura 3.10 - Determinação do ângulo de perdas dielétricas	30
Figura 3.11 - Medida da corrente de excitação em transformadores	31
Figura 3.12 - Descarga parcial no meio dielétrico	32
Figura 3.13 - Ações de manutenção preditiva em transformadores	34
Figura 3.14 - Comportamento do tempo de operação VS Envelhecimento	36
Figura 4.1 - Relação do envelhecimento do papel com a sua força de tração	42
Figura 4.2 - Concentração da humidade em função da exposição em dias	43
Figura 4.3 - Equilíbrio do sistema papel-ar	44

Figura 4.4 - Aumento da pressão de vapor para o mesmo teor de água a temperaturas diferentes.....	45
Figura 4.5 - Redução do equilíbrio do teor de água com a diminuição da pressão	46
Figura 4.6 - Representação do mesmo meio com diferentes concentrações de fluido em dois pontos	47
Figura 4.7 - Diferença do coeficiente de difusão à pressão atmosférica e em vazio	48
Figura 4.8 - Diagrama geral do sistema de secagem por H.O.S.....	56
Figura 4.9 - Vista geral da máquina de secagem contentorizada	58
Figura 4.10 - Bomba de circulação de óleo	58
Figura 4.11 - Pulverizadores de óleo de 2.500l/h	59
Figura 4.12 - Grupo de vácuo da Edwards	59
Figura 4.13 - Painel do secador com os indicadores de temperatura	60
Figura 4.14 - Sonda K ligada a um multímetro com função de leitura de temperatura.....	60
Figura 4.15 - Sonda de leitura de vácuo Leybold Thermovac TR211 instalada na cuba do transformador e respetivo leitor Leybold Display Two	60
Figura 5.1 - Diagrama do sistema de secagem e variáveis a serem medidas pelo equipamento	62
Figura 5.2 - Placa de prototipagem Arduino Uno	63
Figura 5.3 - Resumo dos pinos da placa Arduino Uno (www.theengineeringprojects.com)	64
Figura 5.4 - Termo resistência PT100 NPT de 1/2 polegada com conector destacável	65
Figura 5.5 - Amplificador de sinal para PT100	66
Figura 5.6 - Exemplo de sonda termopar	67
Figura 5.7 - Módulo de leitura de termopar com MAX6675, usado no projeto.....	68
Figura 5.8 - Sensor de pressão WIKA S-10, usado no projeto	69
Figura 5.9 - Módulo de medição de loops de corrente da ITEAD, usado no projeto	70
Figura 5.10 - Sensor ultra-sónico UC2000-30GM-E6R2-V15 da Pepperl + Fuchs	71
Figura 5.11 - Sensor de vácuo Inficon PSG e display acondicionador sinal Leybold display one	72
Figura 5.12 - Divisor de tensão usado na entrada da porta A0 do Arduino.....	72
Figura 5.13 - HMI da Nextion usado no projeto	73
Figura 5.14 - Módulo de cartão micro SD genérico usado	73
Figura 5.15 - Fonte de alimentação comutável AC/DC 5V, usada no projeto	74
Figura 5.16 - Entradas utilizadas para aquisição dos dados	75
Figura 5.17 - Placa de aquisição de temperaturas (da esquerda para a direita, sonda K, PT100_1, PT100_2)	75
Figura 5.18 - Aferição dos valores medidos das temperaturas.....	76
Figura 5.19 - Placa de aquisição de variáveis para entradas analógicas	76
Figura 5.20 - Módulo completo com Arduino Uno e sensores acoplados.....	77
Figura 5.21 - Protótipo completo após ensaios	77

Figura 5.22 - Início do código na janela do IDE	78
Figura 5.23 - IDE de desenvolvimento dos displays Nextion.....	79
Figura 5.24 - Desenvolvimento do ecrã inicial da HMI	79
Figura 5.25 - Encubagem da parte ativa antes da secagem	80
Figura 5.26 - Montagem dos sprays para o circuito do óleo de circulação	81
Figura 5.27 - Circuito de vazio e bomba de circulação de óleo	81
Figura 5.28 - Dados registados pelo Arduino a cada hora e gravados no cartão SD.....	82
Figura 5.29 - Gráfico da evolução do vácuo na cuba do transformador	87
Figura 5.30 - Gráfico da monitorização da pressão do circuito de óleo	88
Figura 5.31 - Gráfico da monitorização da temperatura do óleo de circulação.....	88
Figura 5.32 - Gráfico da monitorização da temperatura do circuito magnético	89
Figura 5.33 - Gráficos da quantificação de água extraída.....	90

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Falhas associadas ao tipo de gás produzido no óleo	39
Tabela 3.2 - Código das relações dos gases.....	40
Tabela 3.3 - Falhas características em função dos códigos obtidos pela relação da concentração dos gases.....	40
Tabela 4.1 - Valores mínimos dos critérios de aceitação pós-secagem.....	54
Tabela 5.1 - Especificação das PT100	65
Tabela 5.2 - Especificação dos amplificadores de sinal PT100	66
Tabela 5.3 - Especificação do termopar tipo K usado.....	67
Tabela 5.4 - Especificações do sensor de pressão	68
Tabela 5.5 - Especificações do módulo de medição de loops de corrente da ITEAD	69
Tabela 5.6 - Especificações do sensor ultra-sónico UC2000, usado no trabalho	70
Tabela 5.7 - Especificações do sensor de vácuo Inficon PSG500, usado no trabalho	71
Tabela 5.8 - Valores registados pelo sistema durante o processo de secagem	83

Lista de Siglas

HOS - Hot Oil Spray

GUI - Graphical Human Interface

SEE - Sistema Eléctrico de Energia

hz - Hertz

mks - metro quilograma segundo

SI - Sistema Internacional de Unidades

VAr - Volt Ampere reativo

PPM - Parte Por Milhão

KWh - Kilo Watt hora

EDP - Energias de Portugal

REN - Redes Energéticas Nacionais

DGA - Dissolved Gas Analysis

FEM - Força Electro Motriz

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Num mundo cada vez mais industrializado e dependente de energia sob forma elétrica, as redes de transmissão desde os centros electroprodutores até ao consumidor final, quer sejam grandes centros industriais até ao simples consumidor comum, exigem cada vez mais um elevado nível de fiabilidade de serviço, capaz e sempre disponível.

Para além da industrialização generalizada, o mundo digital em que vivemos e todo o avanço tecnológico a que assistimos principalmente no último século, o ser humano está intrinsecamente ligado e dependente dos equipamentos elétricos que o rodeiam e isso só vem reafirmar que o futuro continuará cada vez mais dependente da eletricidade como força motora de todo um complexo sistema de energia.

Assim sendo, e independentemente da forma como a produção de energia elétrica evolua, o transporte de altas potências a longas distâncias continuará a ser uma realidade e isso continuará a contemplar um sistema composto por linhas de alta tensão, interligadas através de subestações nas mais diversas configurações e distintos locais. Se as linhas que formam as redes são as artérias, no centro dessas subestações reside a máquina que é por natureza o coração de todo o sistema - o transformador.

Considerada por muitos como a máquina elétrica mais eficiente, do ponto de vista teórico, continua a ser o equipamento principal por excelência onde todo o sistema acaba por interligar e formar aquilo que conhecemos como sistema elétrico. Por conseguinte, um transformador de potência tem um papel indispensável e como tal é necessário criar condições para que a máquina mantenha o seu desempenho dentro do mais estável regime de fiabilidade possível - é aqui que entra o peso de uma boa gestão de manutenção de ativos - onde o transformador, na maior parte das vezes é explorado em regime contínuo ao longo de toda a sua vida útil, e como tal terá de ser acompanhado com um plano de manutenção preditiva que evite na pior das hipóteses uma situação de defeito.

Um dos procedimentos mais importantes numa intervenção de manutenção preventiva, é uma secagem á sua parte ativa. Neste sentido, o tema desta dissertação centra-se numa técnica específica de secagem, enraizada já nos procedimentos internos da EFACEC ENERGIA, na fábrica da Zona Industrial da Arroiteia - Matosinhos, mais precisamente na sua unidade de Service Transformadores de Potência e que engloba vários conhecimentos ao

nível de engenharia, colocando em exercício os conhecimentos práticos do processo e os adquiridos no decorrer do curso de Engenharia Eletrotécnica e no âmbito dos objetivos deste Mestrado em Sistemas Elétricos de Energia.

Por último, de referir também como um dos pontos fortes de motivação para o desenvolvimento deste trabalho, a ideia de uma solução que ajude á minoração do erro humano neste processo, que muitas vezes levam a perdas económicas substanciais nos procedimentos da unidade e igualmente no auxílio ao departamento de engenharia na elaboração dos relatórios finais a apresentar ao cliente.

1.2. Objetivos do trabalho e âmbito de aplicação

A presente dissertação foi desenvolvida através da experiência adquirida tanto em trabalho de campo como em chão de fábrica, ao longo de vários anos e diversos projetos, ao serviço da EFACEC. Este documento teve a necessidade de ser realizado como forma de criar um compêndio técnico de um processo especial e muito particular, englobado no âmbito da manutenção preventiva de transformadores de potência, processo esse denominado de HOS - Hot Oil Spray.

Após uma extensa pesquisa bibliográfica, constatou-se que não existia muita informação dedicada a um tema com importância na indústria da manufatura e manutenção de transformadores e para além de se querer revelar como um estudo aprofundado deste processo, a ideia é através da experiência adquirida ao longo de várias secagens realizadas em campo, propor melhorias sob a forma do desenvolvimento de uma ferramenta que possa tornar o processo mais eficaz, eficiente e acima de tudo seguro para os técnicos que o operam.

Resumindo, este trabalho teve como objetivos os seguintes pontos:

- Estudo técnico do processo de secagem da parte ativa de transformadores de potência, pelo método HOS, aglomerando de forma concisa e especifica literatura em torno da temática;
- Desenvolvimento de um sistema fiável e de baixo custo de implementação, nos equipamentos usados no processo de secagem por HOS, permitindo automatizar parte do processo e registar todas as grandezas envolvidas;
- Desenvolver uma interface homem-máquina interativa, (GUI), com acesso local e em tempo real ao equipamento e evolução das grandezas mensuradas;

- Apurar custos de implementação do sistema nos equipamentos de secagem, com vista a verificar a viabilidade económica da solução e apresentar.

1.3. Organização da dissertação

O presente documento está organizado em seis capítulos, ao longo dos quais são apresentados, de forma estruturada, os diferentes temas que se complementam num todo e que vão de encontro aos objetivos propostos, começando por uma exposição teórica das propriedades de um transformador de potência, á explicação dos diferentes métodos de secagem, com profundidade relativamente ao HOS.

De seguida é apresentada a solução projetada, desenvolvida e implementada no âmbito desta dissertação, com base num sistema automatizado integrado no equipamento de secagem.

Finalmente são tiradas as conclusões do trabalho realizado, mas isto sem antes apresentar o custo de implementação do sistema e as suas mais valias como ferramenta de controlo e registo do processo.

No presente capítulo - Introdução - é descrito o interesse no tema de estudo e contextualizado o seu enquadramento, descrevendo os objetivos principais do trabalho, apresentado no final a organização da presente dissertação.

O segundo capítulo - O Transformador de potência - contempla um enquadramento teórico do transformador de potência enquanto máquina elétrica e apresenta sucintamente uma visão geral sobre a sua função num SEE, as grandezas envolvidas no seu princípio de funcionamento e ainda considerações construtivas e seus componentes internos.

O terceiro capítulo - Manutenção de transformadores - Apresenta em traços gerais a importância das boas práticas de manutenção e sua importância na vida útil de exploração da máquina. Dentro dos processos de manutenção está englobada a secagem da parte ativa de transformadores, contudo, dado este ser o ponto central da presente dissertação, dedica-se o próximo capítulo inteiramente a este tema.

O quarto capítulo - Secagem da parte ativa de transformadores - descreve com mais profundidade o processo de secagem, quais os princípios envolvidos e sua importância para a vida útil de um transformador. São descritos os equipamentos envolvidos no processo de secagem por HOS e os meios necessários á sua realização. São também comparados métodos e apresentados casos reais realizados no âmbito de manutenções preventivas.

Organização da dissertação

O quinto capítulo - Solução técnica desenvolvida - é apresentada a solução projetada no âmbito desta dissertação para o melhoramento do processo de secagem, nomeadamente a solução de hardware usada, neste caso controlada através de um módulo de Arduino¹, que foi depois implementado em caso prático numa das máquinas de secagem da fábrica da EFACEC, e os custos envolvidos no desenvolvimento do sistema.

Finalmente no sexto e último capítulo - Conclusões - é sintetizado o estudo realizado e são apresentadas as principais conclusões sobre a solução proposta. É ainda incluído com desfecho, um espaço com a apresentação de alguns pontos alvo de melhoria para trabalhos futuros e quem sabe a criação de uma solução extensível a outros processos no âmbito da manutenção de transformadores de potência.

¹ Plataforma de prototipagem eletrónica de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída embutido, uma linguagem de programação padrão, a qual tem origem em Wiring, e é essencialmente C/C++.

2. O Transformador de Potência

2.1. A importância do transformador

O transporte de energia elétrica é praticamente assegurado por corrente alternada, e isso só é possível devido à existência do transformador. Na figura 2.1 está representado um transformador de potência.



Figura 2.1 - Transformador de potência EFACEC (Subestação da REN de Lagoaça)

Motivos técnicos, económicos e de segurança levam a serem adotados diferentes níveis de tensão, caso estejamos a falar de produção de energia elétrica nas centrais, do seu transporte através de linhas a grandes distâncias à distribuição dessa mesma energia ao nível do consumo. Desta forma surge a necessidade de adaptar a tensão às diferentes etapas desde a produção ao consumo.

O simples facto da necessidade de adaptar tensões justifica por si só a importância do transformador. Mas existem igualmente outras aplicações que o tornam ainda mais imprescindível no âmbito da energia elétrica.

De entre essas aplicações podemos mencionar:

- Sistemas de energia
 - Transformadores de medida, aparelhos de comando e proteção de circuitos, nomeadamente transformadores de corrente e tensão.
 - Transformadores de isolamento, usados para isolar uma rede, independentemente do seu nível de tensão, ou por exemplo um circuito de medida auxiliar;
 - Transformadores de corrente constante, com a função de fornecer um nível constante de corrente independentemente do regime de carga;
 - Transformadores com saída em regulação, para compensar as quedas de tensão nas linhas de transporte;

O Transformador de Potência

- Transformadores de número de fases. Por exemplo no caso da transmissão é usada a corrente alternada trifásica por questão económicas, contudo, na alimentação de certos circuitos de retificação, existem vantagens no uso de um maior número de fases e isso pode ser feito através de transformadores, inclusive em redução de fases no caso dos transformadores bifásicos usados em tração eléctrica e monofásicos em fornos eléctricos, nas siderurgias e fundições.
- Sistemas de comunicação

No âmbito da energia, os transformadores funcionam praticamente com tensões e frequências constantes, sendo importante que tenham quedas de tensão reduzidas, alto rendimento e uma baixa corrente de excitação.

Quando falamos no âmbito das comunicações, a tensão e frequência variam no tempo, como por exemplo no caso da transmissão de som audível, nomeadamente voz e música, onde os transformadores funcionam em toda a banda das frequências audíveis (entre 16 a 20KHz).

2.2. O transformador na cadeia da energia eléctrica

Uma cadeia de energia eléctrica é composta por quatro etapas, sendo elas a produção, o transporte, a distribuição e o consumo.

No respeitante á fase de produção, esta pode ser dividida em dois tipos de produção nacional que se caracterizam como PRO - Produção em Regime Ordinário e PRE - Produção em Regime Especial, consoante o tipo de fonte de energia primária utilizado, nomeadamente as não renováveis com recurso a combustíveis fósseis (centrais termoeléctricas de gás natural ou carvão) e renováveis, com a utilização de energia não fóssil (centrais hidráulicas, eólicas, solares e de biomassa).

Seria técnico-economicamente inviável produzir energia eléctrica a um nível de tensão igual aos valores usados no transporte e é por essa razão que á saída de uma central de produção está sempre uma subestação elevadora de forma a poder aumentar o valor da tensão para níveis viáveis de transporte, com vista á diminuição de perdas².

Estas subestações elevam o valor de tensão de produção, na ordem de grandeza dos 5 a 20kV para valores standard da REN (no caso de Portugal) que podem ser de 150, 220 e 400kV.

Já próximo dos centros de consumo ficam as subestações abaixadoras de interligação, ou seja, são responsáveis por entregar a energia eléctrica às distribuidoras, no caso de Portugal,

² Perdas por efeito de Joule – $P_{\text{Joule}} = R \times I^2$

O Transformador de Potência

maioritariamente à EDP a um nível de tensão mais baixo, nomeadamente 60kV. A estas subestações podem ser ligados diretamente os grandes consumidores industriais alimentados diretamente em média tensão, dado que por questões económicas se torna mais rentável.

E no extremo da cadeia ficam os PT's, próximos dos consumidores finais de baixa tensão, no caso de Portugal, em 400VAC trifásicos ou 230VAC monofásicos.

Na base de toda esta cadeia de transporte desde a produção ao consumidor final, estão os transformadores de potência que sem os quais não seria possível variar os diferentes níveis de tensão, tal como se representa na figura 2.2.

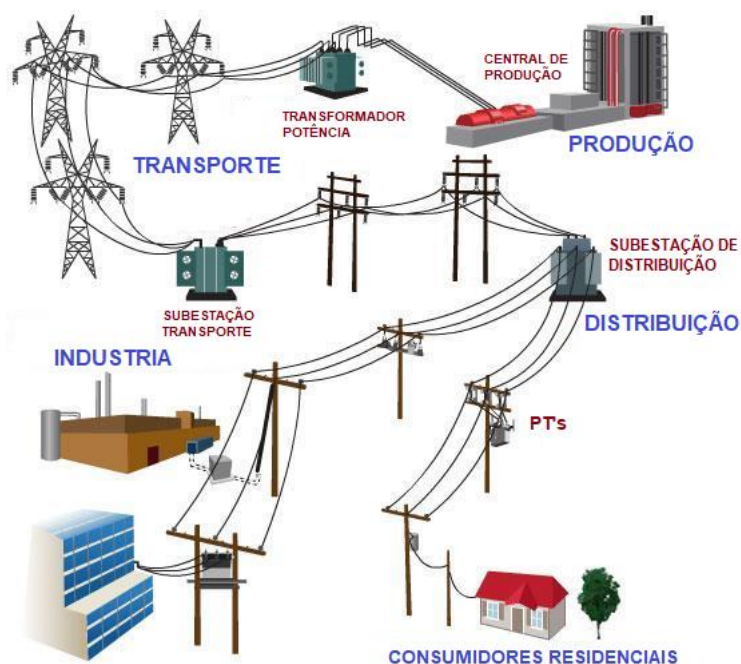


Figura 2.2 - Cadeia da energia elétrica

2.3. Conceito básico de fluxo magnético

O transformador é uma máquina elétrica estática que absorve energia elétrica através de um enrolamento primário e a entrega, transformada, através de um ou mais enrolamentos que são isolados eletricamente entre si [1]. É considerado uma máquina estática pelo facto de não possuir elementos em movimento, e contrariamente a um motor elétrico, onde ocorre uma conversão de energia, elétrica em cinética, num transformador ocorre sim, uma transferência de energia elétrica entre pelo menos dois circuitos isolados entre si, acontecendo a alteração de características das suas grandezas e características, tal como por exemplo a tensão, intensidade e o número de fases. A forma de transferência de energia

O Transformador de Potência

de um circuito para o outro é realizada através de um campo magnético comum aos dois. Em todos os casos, excetuando autotransformadores³, não existe ligação elétrica comum entre os dois circuitos.

A transferência de energia é realizada através da indução magnética, que tem como base, a lei de Faraday que refere que, quando existe uma variação do fluxo eletromagnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida. Dado que, os enrolamentos são fixos, é necessário que entre eles haja um acoplamento magnético na base de um fluxo comum aos dois enrolamentos e que esse mesmo fluxo seja variável no tempo, tudo isto baseado na lei física de que quando uma corrente alterada flui num condutor, é formado um campo magnético á sua volta E^4 exemplificado nas figuras 2.3 e 2.4. É por este motivo que o transformador só funciona em corrente alternada.

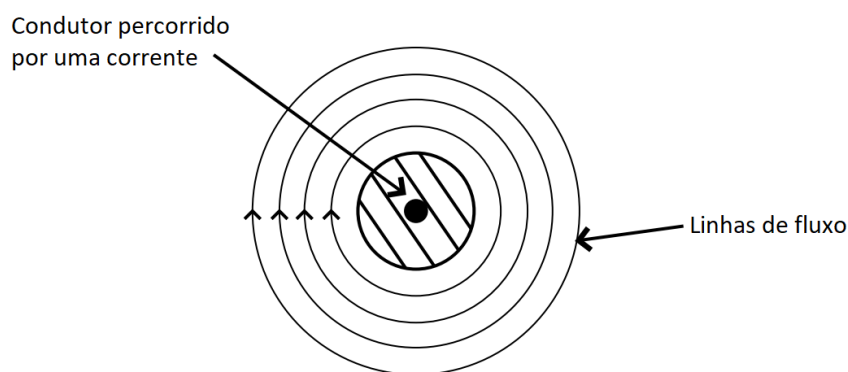


Figura 2.3 - Campo magnético em torno de um condutor

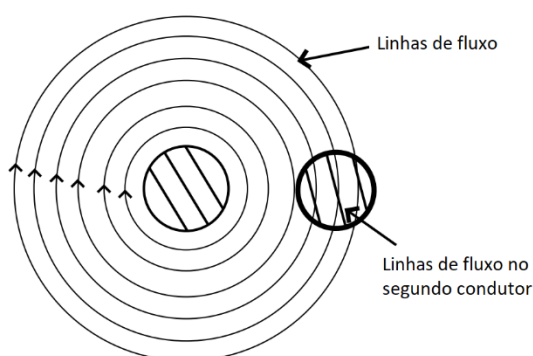


Figura 2.4 - Campo magnético em torno de um condutor, induz tensão num segundo condutor.

³ Transformador em que pelo menos dois enrolamentos têm uma parte em comum (IEV 41-01-11 / CEI60076-1)

⁴ Christian Oersted (1777 – 1851), verificou através de suas experiências, ao colocar uma bússola junto a um condutor percorrido por uma corrente elétrica, que a agulha se orientava num sentido diferente de quando deixava de passar corrente no condutor.

$$E = N \, d\Phi / dt \quad (2.1)$$

$$J = (\sqrt{2}E) / (2 \pi f N) \quad (2.2)$$

Como a quantidade de fluxo Φ da segunda bobine é uma percentagem pequena do fluxo da primeira bobina, a tensão induzida na segunda bobina é pequena. O número de voltas pode ser aumentado de forma a aumentar a tensão de saída, mas isto aumentará muito o custo de construção. Portanto a necessidade é de aumentar a quantidade de fluxo do enrolamento primário para o secundário.

2.4. Parte ativa do transformador

Considera-se como parte ativa de um transformador os seus constituintes responsáveis pelo processo de transformação de energia e os quais estão sujeitos á passagem de corrente por tensão induzida bem como por fluxo magnético. Estes constituintes são formados pelo seu circuito magnético / núcleo, pelos enrolamentos que compõem a sua bobinagem e também, no caso de ser dotado de tomadas de regulação, pelo seu regulador em carga. Na figura 2.5 está representado um transformador trifásico descubado com sua parte ativa exposta.



Figura 2.5 - Parte ativa de um transformador durante uma descubagem para reparação

2.4.1. O circuito magnético

De forma a assegurar um acoplamento magnético eficiente, ambos os enrolamentos envolvem um circuito magnético com uma elevada permeabilidade, obtido através do uso de materiais ferromagnéticos.

O Transformador de Potência

A capacidade do ferro ou do aço de transportar fluxo magnético é muito maior do que o ar. Esta capacidade de transportar fluxo é chamada de permeabilidade⁵. Os aços elétricos modernos têm permeabilidades da ordem de 1500 em comparação com 1,0 para o ar [34]. Isso significa que a capacidade de um núcleo de aço para transportar fluxo magnético é 1500 vezes maior que a do ar. Núcleos de aço foram usados em transformadores de potência quando os circuitos de corrente alternada para distribuição de energia elétrica foram introduzidos pela primeira vez.

Quando duas bobinas são colocadas num núcleo de aço, como ilustrado na Figura 2.6, 100% do fluxo da bobina 1 circula no núcleo de ferro, de modo que a tensão induzida na bobina 2 é igual para a tensão da bobina 1 se o número de voltas nas duas bobinas for igual.

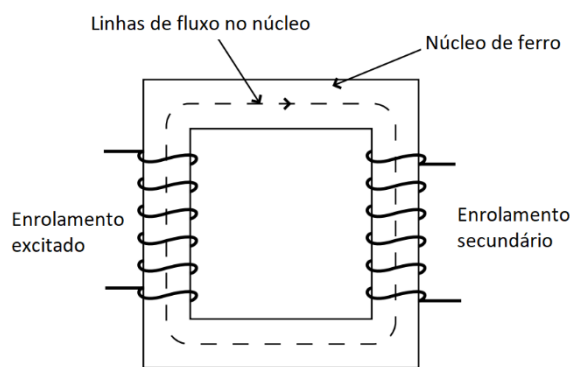


Figura 2.6 - Duas bobinas aplicadas num núcleo ferromagnético

Continuando no sistema mks⁶, a relação fundamental entre a densidade do fluxo magnético (B) e intensidade do campo magnético (H) é:

$$B = \mu_0 H \quad (2.3)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade do espaço livre = $4\pi \times 10^{-7}$ (Wb A⁻¹ m⁻¹)

⁵ Capacidade de um material para suportar a formação de um campo magnético dentro de si, também conhecida como indutância distribuída na Teoria das Linhas de Transmissão.

⁶ O sistema de unidades mks tem o metro, o quilograma e o segundo como suas unidades de base. Embora o sistema mks não inclua unidades de eletricidade ou magnetismo, o sistema SI, que também é baseado no metro, quilograma e segundo, inclui.



Figura 2.7 - Circuito magnético de um transformador

Como o núcleo é percorrido por um fluxo variável, surgem fenômenos de histerese e de correntes de Foucault⁷ dos quais resultam perdas. De forma a limitar essas perdas são usados ferros com ciclos histeréticos de pequena área e adota-se uma construção laminada realizada pelo empilhamento de chapas finas, isoladas umas das outras, conforme figura 2.7. A espessura das chapas dos transformadores usados em sistemas de energia é da ordem dos 0,35mm [1].

Por volta do ano 1900, descobriu-se que a adição de pequenas quantidades de silício ou alumínio ao aço, reduzia significativamente as perdas magnéticas. Assim começou a indústria especializada na produção de aço para aplicação elétrica em transformadores [12].

A adição de silício reduz as perdas por histerese, aumenta a permeabilidade e também aumenta a resistividade, reduzindo assim as perdas de correntes parasitas. A presença de silício tem a desvantagem de o aço se tornar frágil e duro, de modo que, por razões de facilidade de manuseio e facilidade de fabricação do núcleo, a quantidade deve ser limitada a cerca de 4½ % [12].

2.4.2. Enrolamentos

Enrolamentos num transformador são um conjunto de espiras que formam um circuito associado com uma das tensões designadas no transformador [13].

Os enrolamentos, ou normalmente denominados como bobinagem, são constituídos por cobre eletrolítico⁸, que em transformadores de potência assumem a forma de barras isoladas, e com uma camada de verniz sintético e ainda normalmente isolados com papel

⁷ Corrente de Foucault (ou ainda corrente parasita) é o nome dado à corrente elétrica induzida dentro de um material condutor, quando sujeito a um campo magnético variável devido à lei de indução de Faraday.

⁸ O cobre eletrolítico é cobre submetido a refinação ou purificação por eletrólise. A purificação por eletrólise representa o método mais fácil de atingir níveis de pureza de 99,999% em cobre, segundo a Science Clarified.

O Transformador de Potência

Kraft⁹, ou Presspan, o que confere à bobinagem rigidez mecânica e elétrica. Esta representação pode ser vista na figura 2.8. A utilização de barras é normalmente realizada em feixes (várias barras em paralelo devidamente permutadas) dispostos adequadamente em relação ao fluxo de fugas, para reduzir as perdas suplementares. O arranjo das bobinas cilíndricas, no tipo concêntrico, ou em plano, no tipo couraçado-imbricado, é realizado combinando-as adequadamente com elementos isolantes (pressboard, baquelites, etc.), formando um todo conjunto tanto mecanicamente como eletricamente resistente. Em algumas aplicações especiais ou quando se requer uma resistência superior à temperatura, é usado papel crepe de Nomex como isolamento.

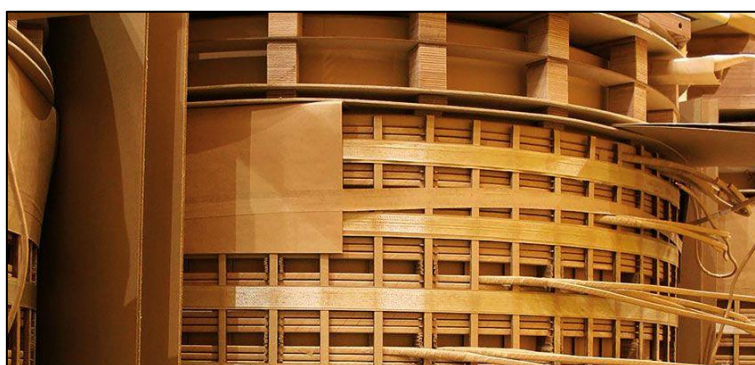


Figura 2.8 - Bobina isolada com papel Kraft (EFACEC, 2018)

2.4.3. Regulador de tensão em carga

A tensão no enrolamento secundário dum transformador em serviço pode variar pela queda de tensão provocada pelo próprio transformador e também pela carga no secundário. São além do mais variáveis em função da carga e também pela variação da tensão primária que resulta da queda de tensão na própria rede. Na figura 2.9 está representado um exemplo de um regulador em carga instalado no transformador.

Há todo o interesse, especialmente quando falamos de redes interligadas como ao nível do transporte de electricidade, de equipar os transformadores com a possibilidade de ajuste na tensão. Dada a correlação entre a ligação da tensão primária e secundária dum transformador, esse ajuste é possível variando a razão de transformação por meio da alteração do número de espiras num dos enrolamentos [18]. Esta alteração é conseguida através de tomadas que se localizam, de um modo geral, no enrolamento de maior tensão, dado que a intensidade de corrente é menor e de forma a permitir para uma dada variação

⁹ Papel fabricado a partir de uma mistura de fibras de celulose curtas e longas, provenientes de polpas de madeiras macias.

O Transformador de Potência

da razão de transformação um maior espaçamento entre tomadas sucessivas, por causa do seu maior número de espiras, o que torna mais simples a sua construção e o isolamento.

Os transformadores necessitam de tomadas de regulação por diversos motivos:

- Para compensar as alterações na tensão aplicada no fornecimento e em outros transformadores do sistema.
- Para compensar a regulação no próprio transformador e manter a saída de tensão constante.
- Nos transformadores acoplados a geradores e de interligação para assistir no controle do fluxo Var.
- Para permitir compensações devido a fatores ainda desconhecidos no momento de planeamento do sistema elétrico.
- Para permitir alterações em futuras condições do sistema.

Por vezes as tomadas de regulação são colocadas na parte central do enrolamento, nomeadamente:

1. Os enrolamentos dum transformador estão sujeitos a descargas atmosféricas, que se fazem sentir principalmente com maior intensidade, sobre as espiras na vizinhança dos terminais de entrada de linha. Por essa razão deverão ser tomados cuidados especiais com o isolamento das tomadas de regulação se as mesmas se localizassem nos extremos dos enrolamentos, o que tornaria mais dispendiosa a sua construção.
2. As tomadas de regulação nos extremos dos enrolamentos podem permitir fugas de fluxo pelas travessas do circuito magnético.
3. As tomadas de regulação nos extremos criam assimetria ao nível dos esforços eletrodinâmicos sobre os enrolamentos, quando não estão incluídas todas as espiras.

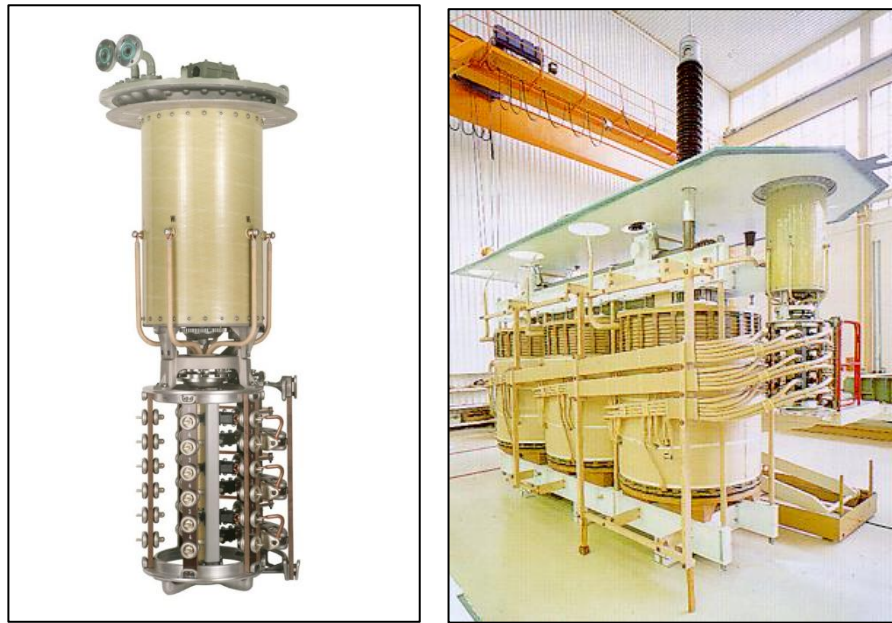


Figura 2.9 - Regulador em carga Maschinenfabrik Reinhausen Tipo Oiltap M e seu exemplo de instalação num transformador EFACEC.

2.4.4. Isolamento

No que respeita a um transformador de potência, nunca é demais enfatizar a importância de um sistema de isolamento confiável. Problemas de falha de isolamento interno são invariavelmente os mais sérios e os mais caros de solucionar. As altas potências envolvidas nas redes elétricas dos nossos dias, aquando de um curto-circuito, quase sempre resultam em grandes danos para o transformador.

No entanto, perdas consequenciais, como a indisponibilidade de uma grande unidade produtora, podem ser muito mais caras e abrangentes do que o próprio transformador.

As crescentes demandas impostas ao fornecimento de eletricidade levaram a um aumento no tamanho das unidades e a tensões de transporte cada vez maiores. As tensões nominais do transformador e sua potência continuam a aumentar em função dessa demanda, sem exceder os limites físicos da máquina, em grande parte devido ao melhor uso do valor intrínseco do isolamento. Um aspeto vital é a vida do transformador, e isto depende quase totalmente do projeto e condições do isolamento [12].

2.4.4.1. Isolantes sólidos

O papel é um dos mais baratos e melhores materiais de isolamento elétrico conhecidos. O papel isolante usado em transformadores deve atender a certos padrões físicos e químicos; e para além disso, devem atender a certas especificações para uso em meio elétrico.

Propriedades elétricas são, em geral, dependentes das propriedades físicas e químicas do papel. As propriedades elétricas importantes são:

- Alta rigidez dielétrica;
- Constante dielétrica, principalmente em transformadores cheios com o mais parecida possível com o óleo usado;
- Baixo fator de potência (perda dielétrica);
- Livre de partículas condutoras (alta pureza).



Figura 2.10 - Diversas aplicações do papel isolante Kraft (Weidmann Electrical Technology AG)

A constante dielétrica do papel kraft é de cerca de 4,4 e para o óleo de transformador o valor é de aproximadamente 2,2. Num sistema de isolamento que consiste de diferentes materiais em série, estes compartilham a tensão em proporção inversa aos seus elementos dielétricos, de modo que, por exemplo, no sistema de barreira de alta para baixa de um transformador, o stress no óleo será o dobro do que no papel [12].

Para um projetista de transformadores a melhor situação seria ter constante dielétrica do papel o mais próxima possível da do óleo, de modo que o papel e o óleo compartilhassem o mesmo stress.

Existem outros tipos de papel usados em aplicações mais específicas, contudo podemos mencionar dois tipos com relevada importância e amplamente usados:

O Transformador de Potência

1. Papel crepado

O papel crepado é provavelmente o primeiro dos tipos de papel especiais a ter sido empregue em transformadores . É texturado com uma espécie de rugas que aumenta a sua espessura e extensibilidade. Representação na figura 2.11. É normalmente produzido cortado em tiras com cerca de 20 a 40mm de largura e é ideal quando é necessária a aplicação manual de isolamento em ligações, condutores ou em anéis de controlo de tensão electrostática que devem ser colocados entre as secções finais dentro dos enrolamentos. Sua extensibilidade permite que ele seja moldado para se adaptar a contornos irregulares ou para formar curvas que podem ser necessárias, por exemplo, nas cravações.



Figura 2.11 - Pormenor de um rolo de papel crepado (Flexfilm)

2. Papel Nomex¹⁰

Com sistemas de isolamento baseados em Nomex, o peso de um determinado transformador imerso em óleo isolante pode ser reduzido em até 25% para uma dada saída de kVA. Por outro lado, a potência em kVA pode ser aumentada em até 50% para um determinado tamanho e peso [4].

Maior resistência á temperatura mantendo excelentes propriedades elétricas.



Figura 2.12 - Pormenor de um rolo de papel Nomex (DuPont)

¹⁰ DuPont™ Nomex®

2.4.4.2. Óleo isolante

A vida útil de um transformador é determinada parcialmente pela sua capacidade de dissipar o calor produzido internamente. Todos os transformadores de potência imersos em óleo mineral são projetados para atender a determinados critérios operacionais em relação às temperaturas. A capacidade térmica do óleo e enrolamentos permite operações de cargas acima da média por períodos curtos. Isso geralmente é o que se entende por classificação térmica, como por exemplo:

1. Aumento médio da temperatura dos enrolamentos (acima da temperatura ambiente) $< 65^{\circ}\text{C}$, a uma carga nominal.
2. Temperatura do óleo superior $< 60^{\circ}\text{C}$, a uma carga nominal.
3. As temperaturas do ponto quente não podem exceder os 125°C , à temperatura ambiente de 20°C .
4. Capacidade cíclica de 1,2 por unidade.

Um conhecimento aprimorado sobre as características térmicas dos transformadores, permite uma correta classificação dos seus valores nominais e reduz os riscos associados às operações de emergência pós-falha. [30]

Tanto para o projetista quanto para o utilizador de um transformador imerso em óleo, é importante ter alguma compreensão da composição e das propriedades do óleo do transformador. Tal entendimento pode ajudar muito na obtenção de um ótimo desempenho do transformador durante toda a sua vida operacional.

A resistência elétrica dos condutores das bobinas num transformador, provoca aquando a passagem da corrente, o seu aquecimento. Esse calor produzido, irá provocar a degradação do material isolante, logo, quanto mais eficientemente for minimizado maior será a vida útil do sistema.

A principal função dos isolantes fluidos é a refrigeração das espiras de material condutor. Além disso, facilmente se observa que quanto melhores forem as características isolantes do fluido utilizado, mais económico poderá ser o projeto do sistema, pela redução da quantidade do isolante sólido e pela diminuição das distâncias entre espiras, entre bobinas e núcleo e entre estes e as partes ligadas à terra como por exemplo a cuba.

Os líquidos isolantes devem cumprir duas funções principais nos transformadores:

a) Arrefecimento

As perdas de energia nos outros materiais do transformador, nomeadamente por efeito de calor nos componentes ferrosos e no cobre dos enrolamentos, atingem um equilíbrio quando o calor produzido está a ser evacuado tão rápido quanto está a ser produzido. Para a grande maioria dos transformadores, este limite de temperatura é estabelecido pelo uso de isolamento de papel, que quando se pretende que tenha uma vida útil aceitável, deverá ser limitado a uma temperatura em torno dos 100°C.

Portanto, o arrefecimento eficiente é essencial, e num caso geral, menos para transformadores pequenos, isso é melhor alcançado através de um líquido. Para a maioria dos transformadores, o óleo mineral é o meio mais eficiente para absorver calor do núcleo e dos enrolamentos e transmiti-lo, às vezes auxiliado por circulação forçada, às superfícies exteriores arrefecidas natural ou artificialmente. A capacidade de calor, ou calor específico, e a condutividade térmica do óleo têm uma influência importante na taxa de transferência de calor.

b) Isolamento elétrico

Na maior parte dos equipamentos elétricos há um grande número de diferentes partes a diferentes potenciais e existe, portanto, a necessidade de as isolar umas das outras. Se o equipamento é para ser construído o mais economicamente possível, a separação entre estas diferentes partes terá de ser reduzida o mais possível, o que significa que o equipamento terá de trabalhar ao mais alto stress elétrico possível.

Em adição, os transformadores de potência têm com frequência de ser explorados por curtos períodos de tempo, acima do seu valor nominal de tensão ou suportar transientes do sistema elétrico, devidos a manobras de abertura e fecho de circuitos ou descargas atmosféricas.

Ao óleo é também requerida uma importante contribuição para a eficiência do isolamento sólido, pela sua penetração nos espaços vazios entre camadas de isolamento e impregnação, após papel e outros isolantes de origem celulósica, terem sido secos e desidratados pela exposição ao vácuo.

Como uma indicação da importância que é colocada na força dielétrica, deve-se notar que, por muito tempo, desde os primórdios dos transformadores, um teste de resistência de isolamento elétrico foi o único indicador da sua qualidade elétrica. Ainda hoje, quando existem muitos testes mais sofisticados, o teste de resistência de isolamento ainda é considerado como o mais simples e conveniente teste para realização no campo.[12]

O Transformador de Potência

Resumindo, os óleos isolantes para transformadores devem apresentar as seguintes características fundamentais [SHELL]:

- Boa condutibilidade térmica;
- Boas características de isolamento elétrico;
- Baixa viscosidade;
- Boa estabilidade térmica;
- Baixa reatividade química;
- Resistência ao fogo.

3. Manutenção de transformadores

3.1. Objetivos da manutenção

A necessidade de sistemas elétricos cada vez mais fiáveis e estáveis, obriga a que os equipamentos estejam sempre com 100% de capacidade e disponibilidade. Sendo os transformadores de potência um equipamento vital para o sistema elétrico e de elevado custo de substituição, o prolongamento da sua vida útil torna-se imprescindível.

A esperança de vida de um transformador depende inicialmente no desenho e qualidade de fabrico e posteriormente nas condições de exploração e nas práticas de manutenção. No diagrama da figura 3.1 estão representados os diferentes tipos de manutenção.

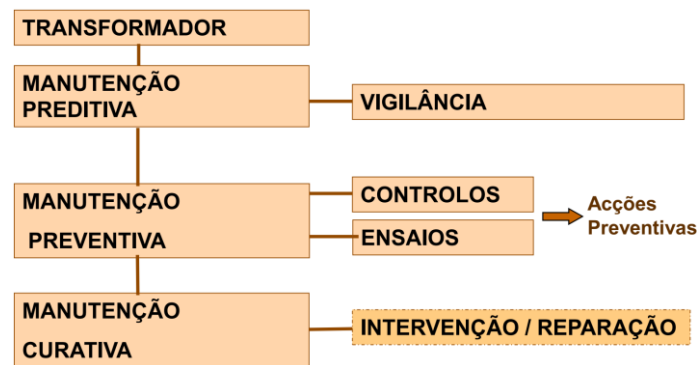


Figura 3.1 - Os diferentes tipos de manutenção realizadas em transformadores

3.2. Envelhecimento

A vida útil de operação dos transformadores de potência resulta de vários fatores, normalmente marcada por uma operação variável, podendo atingir 20 anos. Uma manutenção eficaz permite aumentar em média a operacionalidade de um transformador, alcançando mais de 40 anos de operação [22].

Os transformadores praticamente não têm peças móveis, com exceção dos comutadores de tomadas, ventiladores ou bombas de óleo, pelo que o desgaste é bastante inferior a outros equipamentos elétricos, como as máquinas rotativas. Com a adequada proteção, as cubas de ferro, os circuitos magnéticos de chapa laminada, os enrolamentos de cobre e os outros componentes, podem praticamente durar indefinidamente. Mas os materiais isolantes (sólidos - papel e cartão fabricados principalmente a partir da celulose; líquidos - óleo

Manutenção de transformadores

dielétrico), deterioram-se sob efeito da temperatura, humidade e oxigénio. Quando o isolamento deixa de ser garantido, o transformador falha.

A qualidade da vigilância do estado e de manutenção do óleo isolante é essencial para assegurar o bom funcionamento dos transformadores de potência. Quando o óleo atinge um determinado nível de degradação, as margens de segurança de funcionamento são bastante reduzidas facilitando a falha prematura do transformador.

No entanto, quando o óleo isolante atinge o fim de vida, pode sempre ser substituído por óleo novo, ao contrário do papel isolante. Por estes motivos, a vida de um transformador está normalmente associada à vida do seu isolamento sólido.

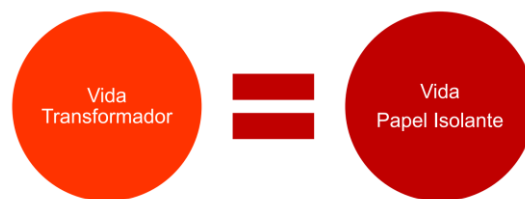


Figura 3.2 - Longevidade do transformador relacionada diretamente com a vida do papel isolante

Esta regra é válida, considerando que o transformador funciona sempre em condições normais de exploração, o que raramente acontece. Vários outros fatores podem contribuir para uma falha prematura do transformador:

- a) Fatores associados à condição de exploração da máquina
 - Curto-circuitos
 - Sobrecargas
 - Sobretensões
- b) Fatores associados ao estado da máquina
 - Degradação do óleo isolante com o tempo
 - Degradação dos isolantes sólidos ao longo do tempo devido à temperatura, humidade e oxigénio
 - Avaria em acessórios

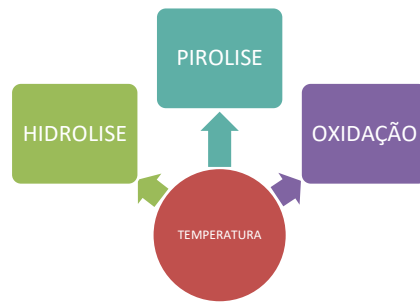


Figura 3.3 - Envelhecimento dos isolantes (sistema papel-óleo)

3.2.1. Processos de envelhecimento dos isolantes

Os isolantes podem ter diferentes processos de envelhecimento, nomeadamente:

- Degradação dos isolantes com a temperatura, ou seja, envelhecimento térmico (Lei de Montsinger¹¹).
- Degradação espontânea dos isolantes por pirólise¹² com temperaturas >300°C.
- Degradação por hidrólise¹³ da celulose, funcionando como catalisadores os ácidos resultantes da decomposição do óleo.
- Degradação por oxidação da celulose sob ação da temperatura e oxigénio, funcionando o cobre como catalisador.

3.2.2. Agentes aceleradores do processo de envelhecimento dos isolantes

No que respeita ao envelhecimento dos isolantes, existem diferentes agentes que influenciam esse processo, como por exemplo:

- A temperatura é sempre um fator acelerador de todos os processos.
- Decomposição do óleo sob a ação da temperatura, oxigénio e campo elétrico, torna o óleo com maior acidez e por sua vez acelera o processo de degradação por hidrólise.

¹¹ V.M. Montsinger descobriu que a velocidade da degradação do papel num transformador duplica com um aumento de 8°C acima do valor de temperatura máxima de serviço.

¹² Decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. Ocorre uma rutura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigénio.

¹³ É uma reação química de quebra de ligação química de uma molécula com a adição de uma molécula de água.

- O próprio processo de decomposição da celulose produz água que por sua vez acelera o processo de degradação por hidrólise.

3.2.3. Lei de Montsinger

Com a temperatura média durante o tempo de vida do transformador, a redução desse tempo pode ser determinada com o Curva de Montsinger da figura 3.4. Por exemplo, a temperatura operacional máxima permitida é 90 ° C e a temperatura média do tempo de vida é 98 ° C, a redução do tempo de vida total é de 50%. Isto significa que o tempo estimado de vida de um transformador de 50 anos é reduzido para 25 anos se a temperatura operacional máxima permitida for excedida em média 8 ° C.

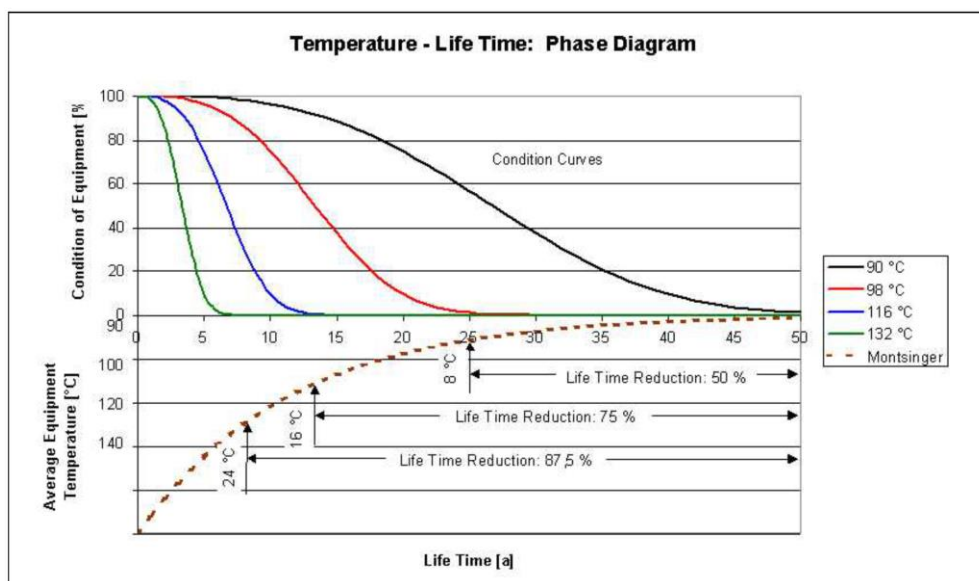


Figura 3.4 - Curva da vida útil de um transformador em função da temperatura (V.M. Montsinger, 1930)

De uma forma mais simplificada, pode ser representada pela figura 3.5 e calculado pela equação 2.1.

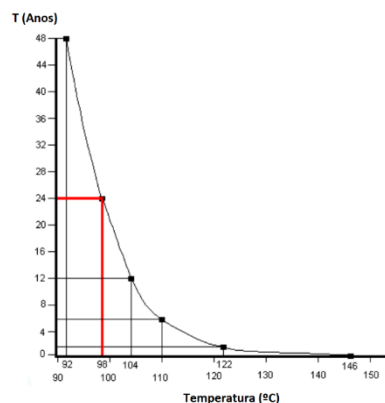


Figura 3.5 - Esperança de vida em função da temperatura

$$T = T_0 \times 2^{-\theta/6} \quad (2.1)$$

T - Vida útil

T₀ - Vida útil normal

θ - Desvio em °C da Temperatura normal (98°C no ponto quente)

Pela lei de envelhecimento dos isolantes, uma variação da temperatura em relação à temperatura ambiente durante um determinado período e carga constante, corresponde à mesma variação de temperatura no ponto quente do enrolamento e numa dada variação do tempo de vida do isolamento em relação ao tempo de vida normal.

Por este motivo, as temperaturas definidas na norma ou especificadas pelo cliente têm intrinsecamente ligadas a si a duração de vida do transformador.

3.2.4. Considerações térmicas

Para as condições ambientes normais, [CEI60076-1, IEC:1993+A1:1999]:

- Temperatura mínima do ar: -25°C
- Temperatura máxima do ar: + 40°C
- Temperatura média mensal máxima: + 30°C
- Temperatura média anual máxima: + 20°C
- Temperatura máxima da água: + 25°C

São permitidos os seguintes aquecimentos:

- Aquecimento do óleo superior (OS): 60K
- Aquecimento do cobre médio (CM): 65/70K (ON ou OF /OD)¹⁴
- Temperatura do ponto quente

A potência nominal do transformador não é mais que a potência a que o transformador poderia trabalhar em contínuo sem afetar a expectativa normal de vida do transformador.

Portanto, quando se define a potência do transformador, estamos no fundo a definir as temperaturas de funcionamento. Uma alteração das temperaturas especificadas relativamente às das normas, é tomada em consideração nos aquecimentos permitidos, por forma a que a expectativa normal de vida do transformador não seja afetada.

¹⁴ ON – Óleo Natural; OF - Óleo Forçado; OD - Óleo Dirigido

3.3. Práticas de manutenção

3.3.1. Manutenção preventiva em transformadores

3.3.1.1. Conceitos básicos

A manutenção preventiva, exemplificada na figura 3.6, é uma técnica baseada na intervenção em equipamentos, corrigindo preventivamente situações ou componentes cuja deterioração ou desgaste é previamente conhecido. Tem como principal objetivo reduzir a ocorrência de falhas, evitando as interrupções de funcionamento e diminuindo os custos da manutenção tradicional corretiva.

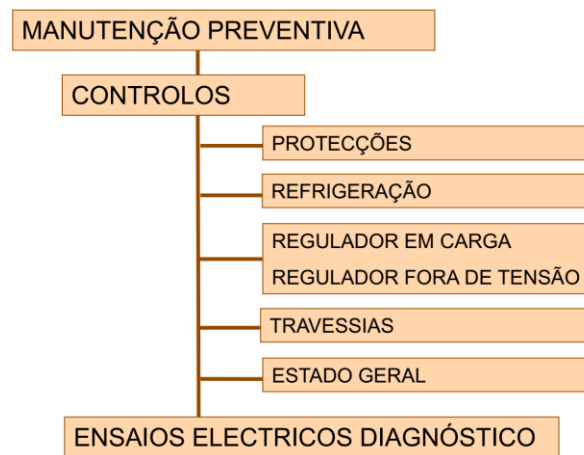


Figura 3.6 - Ações de manutenção preventiva em transformadores.

De uma forma prática, isto traduz-se 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. É também frequente a alteração de condições de operação com o objetivo de aumentar a esperança de vida.

Nos transformadores, o componente mais sujeito ao desgaste e deterioração é o sistema papel/óleo isolante. Assim, a sua vida útil está diretamente relacionada com a vida do isolamento sólido aplicado sobre as espiras. Uma vez perdido este isolamento, a função básica do transformador não poderá ser assegurada e a reparação necessária consistirá no re-isolamento total das bobinas, o que basicamente é inviável do ponto de vista económico.

Nos transformadores, a manutenção preventiva consiste em minimizar os fatores que aceleram o envelhecimento do papel isolante. A manutenção preventiva visa também

otimizar as condições de operação dos transformadores de forma a reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas. No caso dos transformadores isto consiste em manter o meio isolante livre de impurezas que possam prejudicar o seu desempenho.

3.3.1.2. Ensaio de diagnóstico

3.3.1.2.1. Medida da resistência de isolamento dos enrolamentos

A medida da resistência de isolamento dos enrolamentos permite verificar o estado de isolamento do transformador (isolantes sólidos, isolante líquido e travessias). Este ensaio pode revelar informação importante sobre o estado de secagem da parte ativa, estado do óleo e bornes. O diagrama de ensaio está representado na figura 3.7.

É um ensaio muito influenciado por condições externas, pelo que a sua interpretação deve ter em conta, condições atmosféricas, limpeza das travessias, separação do transformador dos barramentos, etc...

Os valores mínimos aceitáveis, com 5000V a 20°C, durante 10 minutos são [5]:

- Transformadores tipo colunas: 5MΩ/KV com um mínimo de 300MΩ
- Transformadores tipo couraçado: 10MΩ/KV com um mínimo de 600MΩ

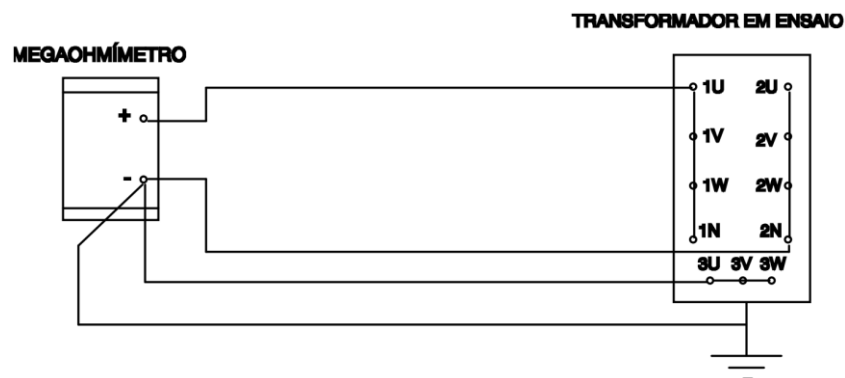


Figura 3.7 - Exemplo de montagem para um transformador de três enrolamentos.

3.3.1.2.2. Medida da relação de transformação

Este ensaio permite verificar a existência de espiras em curto-circuito nos enrolamentos ou problemas graves nos comutadores de tomadas (reguladores em carga ou reguladores fora de tensão). Os valores devem ser comparados com os valores da placa de características, com uma tolerância de 0,5%, e tendo em conta o seu grupo de ligação, conforme representado na figura 3.8.

Caso o erro seja superior ao tolerado, o transformador apresenta, muito provavelmente, defeito grave e não deverá ser colocado em serviço.

GRUPO 0	Dd0 	AB - ab BC - bc CA - ca $r.t. = U_c / u_c$	Yy0 	AB - ab BC - bc CA - ca $r.t. = U_c / u_c$
GRUPO 1	Dy1 	AB - ca.b BC - ab.c CA - bc.a $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$	Yd1 	AB - ca.b BC - ab.c CA - bc.a $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$
GRUPO 5	Dy5 	AB - bc.a BC - ca.b CA - ab.c $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$	Yd5 	AB - bc.a BC - ca.b CA - ab.c $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$
GRUPO 6	Dd6 	AB - ba BC - cb CA - ac $r.t. = U_c / u_c$	Yy6 	AB - ba BC - cb CA - ca $r.t. = U_c / u_c$
GRUPO 11	Dy11 	AB - a.bc BC - b.ca CA - c.ab $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$	Yd11 	AB - a.bc BC - b.ca CA - c.ab $r.t. = U_c / u_c \times 2/\sqrt{3}$

Figura 3.8 - Exemplos de alguns grupos de ligação em transformadores trifásicos.

3.3.1.2.3. Medida das resistências óhmica dos enrolamentos

Este ensaio tem como objetivo detetar a existência de maus apertos nas ligações, pontos quentes nas soldaduras ou cravações, problemas nos contactos dos comutadores de tomadas. Os resultados devem ser comparados com as medidas das outras fases e com os valores de fábrica para se determinar se são aceitáveis.

Uma diferença de 5% a 10% dos valores corrigidos para a mesma temperatura é aceitável.

Dada a relutância dos enrolamentos do transformador, para se obter uma medida estável e correta, é recomendável a injeção de uma corrente equivalente a 10% a corrente nominal. A representação das ligações a realizar neste ensaio estão na figura 3.9.

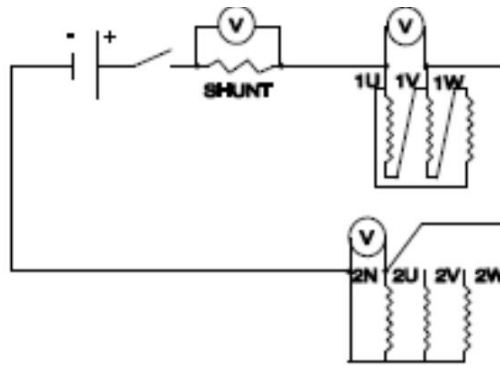


Figura 3.9 - Exemplo de montagem para um transformador de três enrolamentos.

3.3.1.2.4. Medida do fator de potência/dissipação ($\text{tg}\delta$) dos enrolamentos

Todos os isolantes elétricos têm perdas dielétricas independentemente do seu estado. Valores de perdas elevadas podem indicar contaminação no isolamento ou mesmo envelhecimento exagerado. Para além de nos informar sobre o estado global do isolamento à massa e entre enrolamentos, a medida do fator de potência permite uma avaliação do estado de secagem da parte ativa e da deteção de condições de exploração indesejáveis resultantes da presença de humidade, carbonização dos isolantes, travessias defeituosas, contaminação do óleo, etc...

Um transformador novo tem fatores de potência inferiores a 0,5% a 20°C. Com fatores de potência superiores a 1% a 20°C, devem ser analisadas as causas, e provavelmente deverá ser necessário efetuar uma secagem da parte ativa do transformador [33].

Medição da capacidade e fator de dissipação dielétrica ($\text{tg}\delta$) dos enrolamentos do transformador: mede as perdas dielétricas nos enrolamentos, definindo como a tangente do ângulo de perdas dielétricas de isolamento ($\text{tg}\delta$), expressa em percentagem. Em termos ideais a corrente de fuga que flui através dos enrolamentos deveria de ser totalmente capacitiva (corrente adiantada 90° em relação à tensão fase-terra), mas em condições reais isso não é possível tendo-se assim um ângulo próximo de 90°, desta diferença angular origina então o ângulo de perdas dielétricas (δ), conforme representado na figura 3.10.

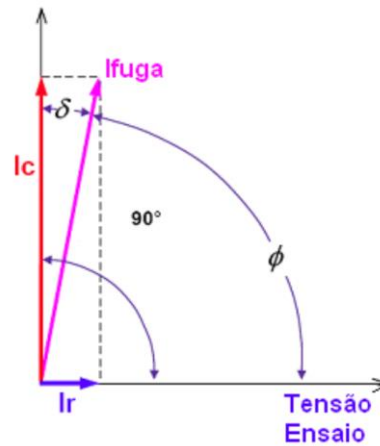


Figura 3.10 - Determinação do ângulo de perdas dielétricas

Fator de dissipação é a razão entre a corrente resistiva (I_r) e a corrente capacitiva (I_c):

$$\text{Tg} \delta = I_r / I_c \quad (3.1)$$

Fator de potência é a razão entre a corrente resistiva (I_r) e o total da corrente através do isolamento (I_t):

$$\text{Cos } \theta = I_r / I_t \quad (3.2)$$

Para valores $\text{tg } \delta < 1\% \rightarrow \text{tg } \delta \approx \text{cos } \theta$

3.3.1.2.5. Medida da corrente de excitação

A medição da corrente de excitação ou consumo do transformador em vazio, permite, principalmente, a deteção de problemas de falha de isolamento entre espiras dos enrolamentos, maus contactos e problemas no núcleo ou comutadores de tomadas.

É recomendável a realização do ensaio com tensão até 10kV e a comparação com os valores de fábrica ou valores de ensaios prévios é essencial.

Uma vez que a corrente de excitação pode ser afetada pelo magnetismo residual do circuito magnético, é recomendável a realização deste ensaio em primeiro lugar.

A representação do método de ensaio encontra-se na figura 3.11.

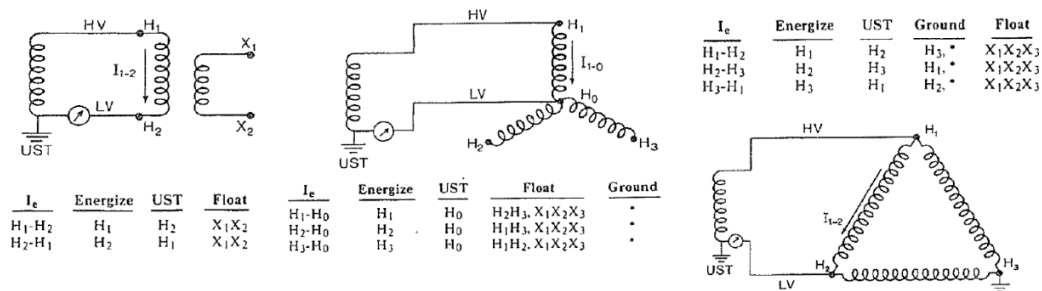


Figura 3.11 - Medida da corrente de excitação em transformadores.

3.3.1.3. Prolongamento da vida útil

O papel isolante utilizado em transformadores é produzido a partir da celulose vegetal de fibras longas. Devido à sua utilização, esta celulose deve ser o mais pura possível para que eventuais impurezas não prejudiquem as suas propriedades isolantes [3].

Assim sendo, o processo de envelhecimento do papel isolante é estudado a partir do comportamento da celulose, que é, do ponto de vista químico, um açúcar polimérico (polissacarídeo) que sofre degradação pela ação do calor e agentes químicos. Entre as reações químicas dos polissacarídeos, a mais importante para o papel isolante é a de hidrólise, isto é, sua decomposição por ação da água:



Sob a ação do calor, a molécula da celulose (1) parte-se em 2 ou mais pedaços (celulose 2), menores que a molécula original.



Em contacto com a água em presença de ácidos e calor, a molécula da celulose hidrolisa-se, resultando em 2 ou mais moléculas de celulose de peso molecular menor que o original. Como em todos os polímeros, as suas propriedades mecânicas e elétricas dependem do peso molecular e, portanto, do tamanho da molécula. A continuidade dos processos descritos acima faz com que o papel isolante perca, ao longo do tempo, suas propriedades de resistência mecânica e elétrica, levando o transformador a falhar [8].

Pode-se concluir, que a principal ação de manutenção preventiva para aumento da vida útil dos transformadores, consiste em proteger o papel isolante da ação do calor, da água e dos compostos ácidos.

3.3.1.4. Prevenção de falhas

Quando os transformadores estão em serviço, o seu sistema isolante é constantemente solicitado eletricamente. Para que não ocorram descargas é necessário que o isolamento esteja sempre em perfeitas condições. Um dos fatores que prejudicam as propriedades isolantes dos materiais é a presença de impurezas misturadas de forma heterogênea.

A existência de descontinuidades nos materiais isolantes deforma o campo elétrico na vizinhança, ocasionando a ocorrência de pequenas descargas parciais (figura 3.12). Este processo altera as propriedades isolantes do material, prejudicando o seu desempenho. Um processo contínuo de descargas parciais num transformador apresenta uma tendência para oxidar e polimerizar o material isolante. Devido a reações químicas na fase gasosa, são produzidos no interior da cuba produtos altamente oxidativos, como o metano [17]. Reações entre este produto e o oxigênio, hidrogênio e carbono, geram ácidos de natureza condutiva, deteriorando as propriedades isolantes do óleo [9]. Este tipo de defeito pode ser encontrado nos ensaios físico-químicos devido à baixa rigidez dielétrica do óleo isolante.

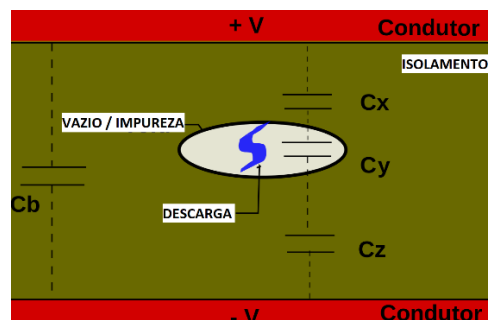


Figura 3.12 - Descarga parcial no meio dielétrico.

No que se refere aos óleos isolantes, estas impurezas consistem principalmente na presença de água e partículas sólidas em suspensão.

3.3.1.5. Comportamento da água

A água pode estar presente nos óleos isolantes em solução ou em suspensão, e a sua interferência nas propriedades do isolante será função da forma em que se encontra.

A água será dissolvida, até o limite da sua solubilidade no fluido em questão e desta forma, formará uma mistura homogênea com o isolante, não interferindo significativamente nas suas propriedades elétricas. A quantidade total de água que um fluido é capaz de dissolver é função da quantidade de compostos polares e oxigenados presentes no líquido. Quando em solução, a água irá participar da reação de hidrólise do papel isolante, diminuindo a sua vida útil.

A água em suspensão no óleo isolante de um transformador irá atuar de maneira idêntica a uma partícula sólida não condutora, alterando o campo elétrico nas proximidades e interferindo negativamente nas propriedades de rigidez¹⁵ e perdas dielétricas.

3.3.1.6. Efeito das partículas sólidas

Os sólidos suspensos nos fluidos isolantes podem ser não condutores e não magnéticos, o seu efeito é idêntico ao já descrito para a água, devendo ser observado que no caso de partículas condutoras e magnéticas, a sua intensidade é extremamente mais elevada. Devemos observar que as partículas em questão são de dimensões microscópicas, na faixa de 0,5 a 200 μm .

A principal ação de manutenção preventiva para prevenção de falhas em transformadores é a remoção de água e partículas sólidas em suspensão.

¹⁵ A rigidez dielétrica de um óleo isolante é uma medida da capacidade do óleo de suportar o stress elétrico sem falhas [IEC156], a partir deste valor, os átomos que compõem o material ionizam-se e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante.

3.3.2. Manutenção preditiva em transformadores

3.3.2.1. Conceitos básicos

Esta é uma técnica mais moderna de manutenção, atualmente em uso e consiste em acompanhar periodicamente, as características e propriedades dos diversos componentes de um sistema e proceder a uma intervenção quando se verifica que se encontra na iminência de falhar, figura 3.13.

É a metodologia mais rentável do ponto de vista económico-financeiro, já que além dos benefícios da manutenção preventiva, evita também intervenções precoces e substituição de partes dos equipamentos que ainda apresentem boas condições de funcionamento.

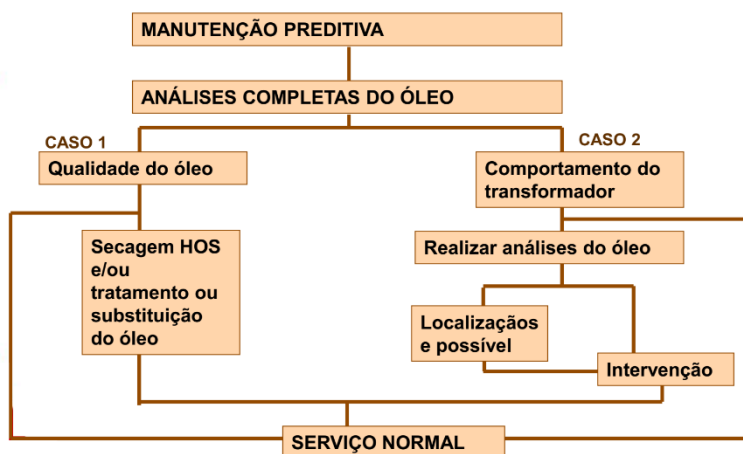


Figura 3.13 - Ações de manutenção preditiva em transformadores

Nos transformadores isolados a óleo a inspeção direta dos seus componentes não é possível sem a retirada de operação dos equipamentos. Já que isto é exatamente o que se procura evitar através da manutenção, será necessário um procedimento indireto.

Durante a operação dos transformadores, o líquido isolante circulará no seu interior, em contacto com todos os demais componentes do equipamento. Assim, na ocorrência de uma falha em qualquer uma das suas partes constituintes, algumas das propriedades do líquido isolante serão alteradas.

A manutenção preditiva nos transformadores, portanto, baseia-se no acompanhamento periódico e sistemático das propriedades do seu líquido isolante.

Qualquer alteração destas propriedades que não seja consequência do envelhecimento normal do óleo isolante, será uma indicação da existência de falha incipiente no transformador.

3.3.2.2. Falhas em transformadores

Nos transformadores, observar-se-ão dois tipos principais de falha:

- Falhas de Material
- Falhas Elétricas

As falhas de material consistem na degradação precoce dos materiais existentes nos transformadores, sendo as mais comuns a oxidação do aço da cuba ou núcleo, a deterioração dos materiais de soldas, o desfibramento do papel e a deterioração dos demais isolantes sólidos. Nestes casos, ocorrerá a contaminação do líquido isolante pelos materiais degradados na forma de partículas sólidas ou de seus constituintes solúveis, alterando as propriedades do óleo.

As falhas elétricas são consequentes das anteriores, isto é, a ocorrência de pontos quentes por mau contacto ou degradação do papel, sobreaquecimento generalizado devido ao excessivo envelhecimento do óleo ou papel, e descargas elétricas de alta ou baixa energia devido a falhas no isolamento.

Em todos estes casos ocorrerá a elevação da temperatura no ponto onde ocorre a falha e, conseqüentemente, a pirólise de diminutas quantidades do material isolante. Os produtos desta pirólise podem, em muitos casos, ser detetados por meio de ensaios simples.

3.4. Comportamento em serviço dos óleos isolantes

3.4.1 Óleos minerais de uso geral

Estes óleos apresentam reação de oxidação durante a sua operação normal em transformadores e os procedimentos de manutenção devem levar em conta esta característica.

3.4.1.1 Processo oxidativo dos óleos minerais isolantes

Os óleos minerais isolantes são constituídos basicamente por compostos químicos da classe dos Hidrocarbonetos. Portanto, o seu comportamento relativamente à oxidação será determinado por estes compostos.

Os Hidrocarbonetos, sob a ação do calor, reagem com o oxigénio dissolvido no óleo conforme a seguir indicado:

- 1) $\dots\text{C-C-C}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \dots\text{C-C-C}\cdot (\text{RADICAL LIVRE}) + \text{H}_2\text{O}$
- 2) $\dots\text{C-C-C}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \dots\text{C-C-C-O-O}\cdot (\text{RADICAL PERÓXIDO})$
- 3) $\dots\text{C-C-C-O-O}\cdot + \text{C-C}\dots \rightarrow \dots\text{C-C-C-O-O-H} (\text{HIDROPERÓXIDO}) + \dots\text{C-C}\cdot (\text{RADICAL LIVRE})$
- 4) $\dots\text{C-C-C-O-O-H} + \text{O}_2 \rightarrow \dots\text{C-C-C-O-O}\cdot (\text{RADICAL PERÓXIDO}) + \text{OH}$

Como se pode observar, as etapas 2, 3 e 4 formam uma reação em cadeia, isto é, repete-se indefinidamente com velocidade crescente ao longo do tempo. A etapa lenta da reação é a primeira, a reação do hidrocarboneto com o oxigénio.

Por isso, os aditivos antioxidantes devem ser substâncias que atuem nesta primeira etapa, reagindo com os radicais livres formados sem dar origem a novos radicais livres. Este comportamento é observado nos compostos aromáticos leves, que constituem a maioria dos antioxidantes para óleos minerais [21].

O desenvolvimento da reação ao longo do tempo, pode ser representado graficamente na figura 3.14.



Figura 3.14 - Comportamento do tempo de operação vs Envelhecimento

Observa-se neste gráfico uma inflexão acentuada no ponto 3, representando o momento em que a concentração de produtos da oxidação torna-se significativa e, portanto, quando a manutenção preventiva deve realizar-se.

Os mecanismos de terminação da reação de oxidação são os seguintes:

- 1) RADICAL PERÓXIDO + RADICAL PERÓXIDO → **ÁLCOOIS**
- 2) HIDROPERÓXIDOS + O₂ → **ÁCIDOS**
- 3) **ÁCIDOS + ÁLCOOIS → ÉSTERES POLIMÉRICOS (BORRAS/LAMAS)**
- 4) RADICAL LIVRE + RADICAL LIVRE → **HIDROCARBONETOS POLIMÉRICOS (BORRAS/LAMAS)**

Estes produtos finais de oxidação são compostos oxigenados com polaridade elétrica na molécula e, portanto, maus isolantes elétricos. Além disso, observamos a presença de ácidos que são aceleradores da degradação do papel isolante [25].

Os produtos poliméricos formados na última etapa da reação, são extremamente prejudiciais, já que pelo seu alto peso molecular são sólidos que se depositam sobre as espiras do transformador impedindo a transmissão do calor. Por serem oxigenados, irão também acumular água, acelerando ainda mais a degradação do papel.

3.4.1.2 Degradação térmica dos óleos minerais

Os hidrocarbonetos sofrem pirólise gerando outros hidrocarbonetos de menor peso molecular. Isto é, sob a ação do calor as suas moléculas “quebram-se” em pedaços de vários tamanhos, incluindo compostos de muito baixo peso molecular e, portanto, gasosos.

Esta reação, obedece a leis termodinâmicas predeterminadas e assim, os produtos gerados pela pirólise serão função da temperatura a que o óleo for submetido. As reações de pirólise mais importantes para a manutenção são as seguintes:

- 1) ...C-C-C-C-C- + CALOR → ...C-C-C-C=C- + H₂ (**HIDROGÉNIO**)
- 2) ...C-C-C-C-C- + CALOR -' ...C-C-C=C- + CH₄ (**METANO**)
- 3) ...C-C-C-C-C- + CALOR -- ...C-C=C- + C₂H₆ (**ETANO**)
- 4) ...C-C-C-C-C- + CALOR → ...C-C=C- + C₂H₄ (**ETILENO**)
- 5) ...C-C-C-C-C- + CALOR → ...C-C=C- + C₂H₂ (**ACETILENO**)

As reações 1 e 3 ocorrem a baixas temperaturas, em seguida, surgem as reações 2, 4 e 5 em ordem crescente de temperatura.

3.4.1.3 Extensão da vida útil

Como verificado anteriormente, a extensão da vida útil dos transformadores isolados a óleo mineral consiste em proteger o papel isolante do ataque da água e compostos ácidos. Os melhores resultados serão obtidos quando a intervenção da manutenção for realizada antes da reação de oxidação chegar às últimas etapas.

Caso seja formada grande quantidade de lamas e compostos ácidos, a troca, secagem, ou regeneração do óleo será ineficiente, já que os produtos sólidos de oxidação permanecerão depositados sobre o papel isolante. A sua remoção só é possível com a abertura da unidade, lavagem da parte ativa e posterior secagem [5].

Para atingir este objetivo, devem-se proceder periódica e sistematicamente aos ensaios que são sensíveis à água, ácidos e materiais oxigenados, isto é, teor de Água, índice de acidez e tensão interfacial [13].

A combinação dos ensaios de acidez e tensão interfacial é que permitem determinar o ponto de inflexão da curva de envelhecimento dos óleos minerais. O ensaio de acidez determina os compostos ácidos já formados e o de tensão interfacial é sensível aos produtos intermediários de oxidação.

3.4.1.4 Prevenção de falhas

Como para os outros óleos isolantes, o objetivo de prevenção de falhas é alcançado pelo acompanhamento das propriedades sensíveis à presença de impurezas insolúveis: rigidez dielétrica e perdas dielétricas.

No caso dos óleos minerais, entretanto, por serem oxidados ao longo do tempo de operação, os valores para avaliação desses parâmetros serão dependentes do grau de oxidação do óleo e, portanto, do seu nível de acidez e tensão interfacial.

As indicações de contaminação por água e partículas detetadas nos ensaios de rigidez e perdas dielétricas devem ser verificadas pelo ensaio de teor de água e, se necessário, ensaios específicos para determinar a quantidade e natureza das partículas presentes.

3.4.1.5 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é realizada determinando-se periodicamente, por Cromatografia da Fase Gasosa, os teores dos gases dissolvidos no óleo.

É importante assinalar que este método de ensaio é sensível a quantidades extremamente pequenas de gases e, portanto, permite detetar falhas elétricas em estágio muito incipiente.

Na prática, toma-se uma amostra de cerca de 50ml de óleo isolante que é, em laboratório, submetida a vácuo para extrair os gases dissolvidos. Uma pequena alíquota destes gases é então analisada e os resultados obtidos são avaliados de acordo com métodos pré-estabelecidos, baseados na temperatura de formação de cada gás. O critério mais simples de diagnóstico é o chamado método dos “Gases Chave”. [13]

Tabela 3.1 - Falhas associadas ao tipo de gás produzido no óleo

MÉTODOS DO GÁS CHAVE	
GÁS CHAVE	FALHA CARACTERÍSTICA
HIDROGÉNIO (H ₂) METANO (CH ₄)	DESCARGAS PARCIAIS NO ÓLEO
ACETILENO (C ₂ H ₂)	ARCO ELÉCTRICO NO ÓLEO
ETILENO (C ₂ H ₄)	SOBREAQUECIMENTO NO ÓLEO
MONÓXIDO DE CARBONO	DESCARGAS PARCIAIS NO PAPEL
MONÓXIDO E DIÓXIDO DE CARBONO	SOBREAQUECIMENTO NO PAPEL

A tabela 3.1 relaciona o gás que predomina na mistura com a falha que lhe deu origem.

A próxima tabela, mostra o chamado método de Rogers para diagnóstico [13]. A exemplo do anterior, está baseado na temperatura de formação dos gases, porém, considera as relações entre os seus teores ao invés de cada gás em separado.

Manutenção de transformadores

1) Obter as relações a seguir e classificá-las, de acordo com o valor obtido da tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Código das relações dos gases

	CÓDIGO			
	< 0,1	0,1 - 1	1 - 3	> 3
Acetileno / Etileno	0	1	1	2
Metano / Hidrogénio	1	0	2	2
Etileno /Etano	0	0	1	2

2) Ordenar os códigos obtidos na sequência apresentada acima e obter o Código de Falha.

3) Aplicar o código de falha encontrado na tabela 3.2 para obter o diagnóstico:

Tabela 3.3 - Falhas características em função dos códigos obtidos pela relação da concentração dos gases

FALHA CARACTERÍSTICA	CÓDIGO
OPERAÇÃO NORMAL	0 0 0
DESCARGAS PARCIAIS DE BAIXA ENERGIA	0 1 0
DESCARGAS PARCIAIS DE ALTA ENERGIA	1 1 0
ARCO DE BAIXA ENERGIA	1-2 / 0 / 1-2
ARCO DE ALTA ENERGIA	1 0 2
FALHA TÉRMICA LEVE	0 0 1
FALHA TÉRMICA DE BAIXA TEMPERATURA	0 2 0
FALHA TÉRMICA DE MEDIA TEMPERATURA	0 2 1
FALHA TÉRMICA DE ALTA TEMPERATURA	0 2 2

É ainda de fundamental importância para a manutenção preditiva, a periodicidade regular na execução das análises. Esta periodicidade é definida de acordo com os diagnósticos obtidos.

4. Secagem da parte ativa de transformadores

4.1. Definição

Tal como já falado nos capítulos anteriores, num transformador existem dois componentes principais que contribuem para o seu isolamento, sendo eles o óleo dielétrico e o papel isolante que envolve os enrolamentos e todos os condutores sob tensão internamente.

O óleo, sendo um líquido que basicamente envolve toda a atmosfera interna do transformador, facilmente se retira da máquina, quer trocando por óleo novo ou então tratando-o através de uma estação de desumidificação e degaseificação, voltando depois a ser injetado no transformador sob vazio, já com as suas características isolantes recuperadas.

O papel, contudo, já não é assim tão linear. Aliás, conforme já descrito nesta dissertação, trocar o papel por novo não é sequer uma solução viável tanto do ponto de vista técnico como económico. O acesso aos enrolamentos é difícil e principalmente porque o isolamento é formado por várias camadas, em função do nível de tensão para o qual se pretende isolamento e como tal, a água impregnada nas camadas mais interiores só poderá ser removida através de um processo que engloba ao mesmo tempo, temperatura e vácuo. O aumento da temperatura irá permitir a água vaporizar e ser lentamente transferida para uma atmosfera de alto vácuo, migrando através das camadas mais interiores até à mais extrema e depois ser expelida para o exterior do transformador pelo próprio vácuo produzido. A este processo dá-se o nome de **Secagem da Parte Ativa**.

Este processo poderá enquadrar-se nas ações de manutenção tanto preventivas como curativas, visto que uma secagem a um transformador pode ser feita como prevenção, baseada nos valores de baixo isolamento, como num processo englobado numa reparação em que haja uma exposição significativa da parte ativa do transformador à atmosfera exterior durante um período longo.

4.2. Origem da água nos isolantes

Resumindo o detalhado no subcapítulo 3.2:

- Humidade residual das estruturas isolantes espessas;
- Humidade vinda do contacto com a atmosfera (secador de sílica-gel, fugas, etc.);
- Decomposição da celulose e óleo sob ação da temperatura e oxigénio;
- Hidrólise da celulose (por cada molécula de água que ataca um monómero de glucose na molécula de celulose, forma-se uma nova molécula de água) catalisada pela presença de ácidos;
- Hidrólise da celulose funcionando como catalisadores os ácidos resultantes da decomposição do óleo.

O envelhecimento térmico dos isolantes é proporcional ao teor de água (a vida é reduzida a metade se duplicar o teor de água) [35].

Pequenas quantidades de humidade aceleram a perda da capacidade de tração do papel, conforme representado na figura 4.1.

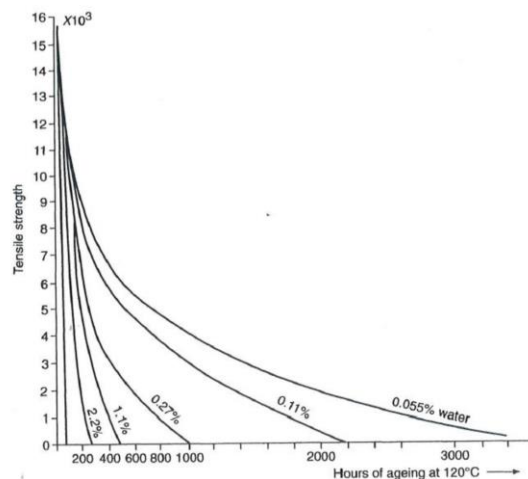


Figura 4.1 - Relação do envelhecimento do papel com a sua força de tração.

Fatos Relevantes

* Dados EFACEC ENERGIA

- Transformador 25MVA, 60/15kV
 - **Massas (Kg):**
 - Parte ativa: 24.000
 - Óleo: 10.500
 - Papel isolante: 920
 - **Água nos isolantes:**
 - 1% no papel: 9,2 Kg
 - 0,02% no papel: 0,46 Kg

Secagem da parte ativa de transformadores

- 40ppm 0,42 Kg
- Transformador 40MVA, 60/31,5kV
 - **Massas (Kg):**
 - Parte ativa: 37.500
 - Óleo: 18.500
 - Papel isolante: 1.470
 - **Água nos isolantes:**
 - 1% no papel: 14,7 Kg
 - 0,02% no papel 0,735 Kg
 - 40ppm 0,740 Kg
- Transformador 450MVA, 400/150/20kV
 - **Massas (Kg):**
 - Parte ativa: 260.000
 - Óleo: 76.500
 - Papel isolante: 17.300
 - **Água nos isolantes:**
 - 1% no papel: 173Kg
 - 0,02% no papel 3,46Kg
 - 40ppm 3Kg

4.3. Estado de secagem do transformador

- Isenção de água capilar;
- Isenção de água a superfície;
- Isenção de água impregnada.

Solução: Impregnação de óleo, sob vazio.

A celulose exposta á atmosfera absorve humidade por difusão, equilíbrio: 4 a 10%.

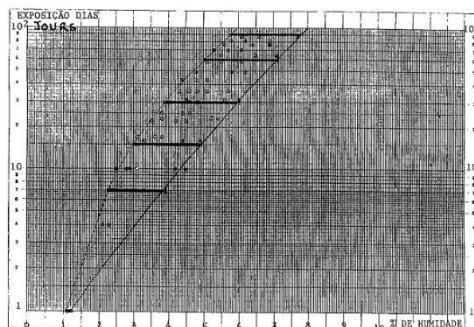


Figura 4.2 - Concentração da humidade em função da exposição em dias.

Secagem da parte ativa de transformadores

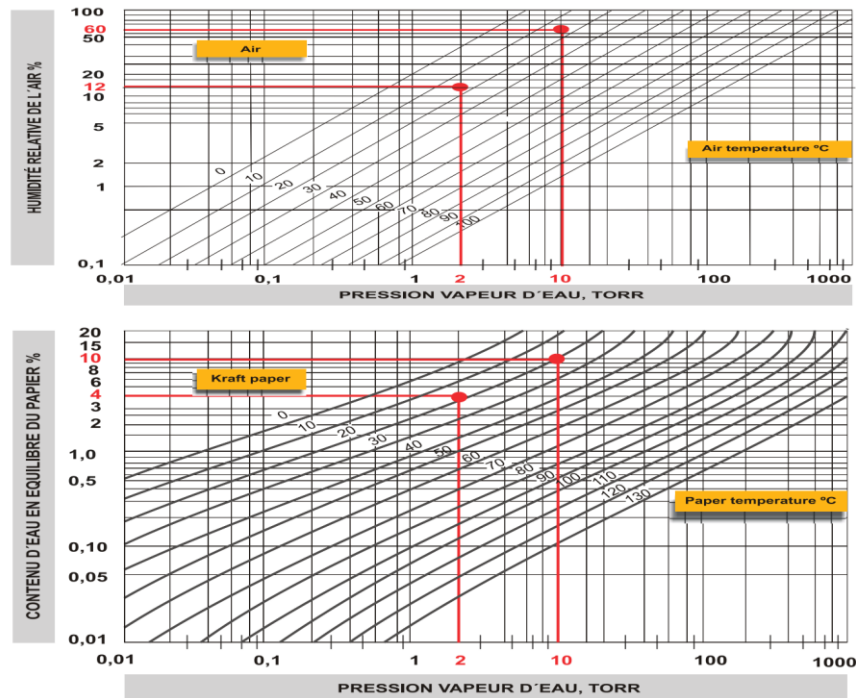


Figura 4.3 - Equilíbrio do sistema papel-ar

4.4. Fenómeno de secagem

É um processo de difusão da água de impregnação, sendo a qualidade da secagem dependente de:

- Temperatura dos isolantes
- Gradiente de pressão
- Coeficiente de difusão dos isolantes
- Duração da secagem: Compatibilidade Económica

Temperatura dos isolantes

A mais elevada, condicionada pelo envelhecimento dos isolantes:

- 110 °C, isolantes impregnados com óleo
- 140 °C, sem óleo e atmosfera isenta de oxigénio

Gradiente de pressão

Para a mesma situação de equilíbrio do teor de água, a pressão de vapor aumenta com a temperatura.

Secagem da parte ativa de transformadores

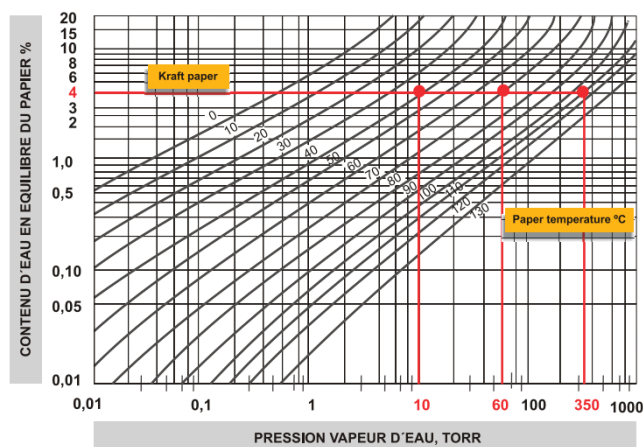


Figura 4.4 - Aumento da pressão de vapor para o mesmo teor de água a temperaturas diferentes.

Para a mesma temperatura (110°C) o equilíbrio do teor de água baixa com a redução da pressão (vazio/vácuo).

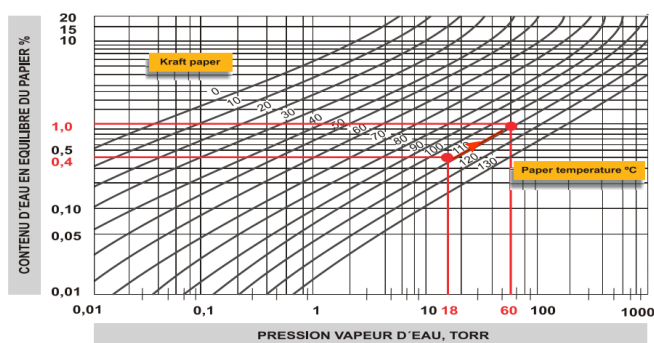


Figura 4.5 - Redução do equilíbrio do teor de água com a diminuição da pressão.

4.5. Os diferentes processos de secagem

A secagem da parte ativa de transformadores pode ser realizada por diferentes métodos, nomeadamente:

CIRCULAÇÃO DE ÓLEO QUENTE

Primeiro, o óleo é aquecido a 80-85 °C, seco e filtrado numa estação de desumidificação. A essência deste método consiste na difusão da humidade das camadas externas de isolamento para o óleo seco e, em seguida, removida numa planta de secagem. É um processo extremamente moroso.

MÉTODO DE CAPTURA A FRIO EM VÁCUO

O transformador é aquecido através de tratamento a vácuo (a pressão residual é de 0,05-1 mmHg). Uma condição obrigatória é manter uma temperatura do isolante superior a 20 °C.

Secagem da parte ativa de transformadores

Tecnicamente, este método é realizado pela projeção de frio para congelar vapor de água. Aumenta a eficiência de vácuo das bombas e permite uma extração adicional de vapor de água da cuba.

MÉTODO TERMO-VÁCUO

Essa abordagem é usada principalmente para secar transformadores com níveis de tensão de 110 a 750 kV. Primeiro, o óleo é aquecido a 80-85 °C, o isolamento é aquecido pela circulação de óleo quente ou pela circulação de corrente nos enrolamentos, então o óleo é drenado e o transformador é submetido a vácuo por 48 horas.

H.O.S. - HOT OIL SPRAY (VAPORIZAÇÃO DE ÓLEO SOB VAZIO)

O transformador é aquecido a 100°C por jatos de pulverização de óleo quente enquanto é submetido a vácuo. A pressão residual não deve ser menor de 5 mm Hg. O tratamento pode ser realizado por vários dias até que a evaporação da água nas colunas de condensação pare. (um caso de isolamento fortemente humedecido). Método muito eficiente para remoção de água impregnada no papel.

SECAGEM A AR QUENTE

Primeiro é aquecido ar limpo a 100 °C, sendo este ar depois passado através do interior do transformador enquanto á sua passagem aquece o circuito magnético e enrolamentos. Esta abordagem é recomendada para transformadores cujas cubas não são projetadas para suportar vácuo absoluto.

SECAGEM POR VAPOR PHASE

Secagem por “Vapor Phase”, consiste na injeção de vapor solvente em Autoclave sob vazio. Método mais eficaz e eficiente de todos, contudo extremamente volátil dado que o fluido usado para transferência de calor é a querosene. Usado normalmente em unidades fabris, não sendo possível de implementar *on-site*.

SECAGEM POR INJEÇÃO DE CORRENTE

Secagem realizada normalmente em transformadores de mais baixa potência, por exemplo em transformadores de distribuição. Injeção de corrente a baixa frequência no enrolamento de menor tensão, fazendo aquecer o condutor que por sua vez aquecerá o isolante. Processo

Secagem da parte ativa de transformadores

realizado dentro de uma câmara de vácuo com a parte ativa exposta, dado que as cubas destes transformadores de distribuição não suportam o vazio.

A presente dissertação irá centrar-se no método de secagem H.O.S. - Hot Oil Spray, que continua a ser um método eficaz com tempos de secagem aceitáveis e muito bons resultados.

É um dos três métodos usados presentemente na fábrica de transformadores da EFACEC ENERGIA, e é um método recorrente nos trabalhos da unidade de Service no âmbito das beneficiações de transformadores tanto em chão de fábrica como no local de instalação.

4.6. Coeficiente de difusão dos isolantes

Difusão é o processo através do qual a concentração de partículas contaminantes varia quando o fluido está em repouso ou, se há escoamento, quando a distribuição de velocidades numa secção qualquer é uniforme. O processo difusivo pode ser o resultado da atividade molecular, a chamada difusão molecular. Energia, quantidade de movimento e massa podem ser transportadas por difusão. Energia sob forma de calor é transferida através de uma fina camada de fluido entre duas placas paralelas fixas de temperaturas diferentes [27]. Quando o óleo de secagem é injetado em spray no interior do transformador e as suas moléculas se evaporam, difundindo-se pelo papel e distribuindo-se em todo o espaço circundante, dá-se o fenómeno da difusão do isolante. A distribuição de moléculas não é homogénea, existindo um gradiente de concentração entre dois pontos do meio. Segundo a Lei de Fick¹⁶: “a velocidade de difusão das partículas é diretamente proporcional ao gradiente de concentração” [27].

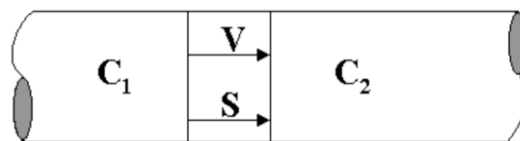


Figura 4.6 - Representação do mesmo meio com diferentes concentrações de fluido em dois pontos.

¹⁶ A lei de Fick é uma lei quantitativa na forma de equação diferencial que descreve diversos casos de difusão de matéria ou energia em um meio no qual inicialmente não existe equilíbrio químico ou térmico. Recebe seu nome de Adolf Eugen Fick, que as derivou em 1855.

Secagem da parte ativa de transformadores

$$F = C \cdot V = - D \frac{dc}{ds}$$

Fluxo do fluido no material

Concentração do fluido

Velocidade

Coefficiente de difusão

Varição da concentração por unidade de comprimento

$$D = - \frac{C \cdot V}{\frac{dc}{ds}}$$
$$[D] = L T^{-1} L = L^2 T^{-1}$$

O coeficiente de difusão (D), designa-se como uma constante de proporcionalidade que mede quão facilmente uma molécula injetada se movimenta através de um determinado meio. Este coeficiente é proporcional à velocidade na qual a molécula se difunde pelo meio e fortemente influenciado pela temperatura, humidade e pressão envolvente.

Sofre forte influência dos fatores:

- Temperatura dos isolantes
- Teor de humidade
- Pressão á superfície

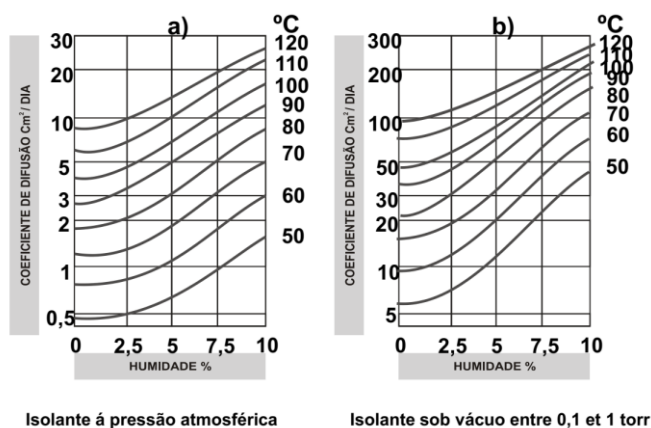


Figura 4.7 - Diferença do coeficiente de difusão á pressão atmosférica e em vazio

No papel impregnado com óleo, o coeficiente de difusão tem um valor entre 20 a 30 vezes menor que no papel isento de óleo. Assim, será necessário atingir nos isolantes uma temperatura elevada (110°C) e um nível de pressão baixo (0,5 mbar).

4.7. Sistema de secagem pelo método H.O.S.

4.7.1. Vantagens do sistema Hot Oil Spray

- Sistema extremamente fácil de transportar para ser usado na instalação onde se encontra o transformador. Todo o sistema pode ser simplesmente contentorizado;

Secagem da parte ativa de transformadores

- Processo de extração de humidade dos isolantes rápida e contínua;
- Atmosfera isenta de oxigénio, logo possibilidade de operação a altas temperaturas sem afetar muito o envelhecimento dos isolantes;
- O vazio funciona como isolante térmico da cuba do transformador;
- Quantidade reduzida de óleo necessária e boa qualidade de secagem;
- Pré-impregnação da celulose, logo redução do coeficiente de difusão e consequentemente estabilização dimensional dos isolantes.

4.7.2. Pontos críticos do H.O.S.

- Duração da secagem e temperatura dos isolantes influenciadas pela disposição dos aspersores dentro da cuba;
- Necessidade de adaptação das tubagens de circulação de óleo á cuba do transformador;

Limite teórico: Humidade relativa de 0,05% nos isolantes

Com temperatura do spray: 100 a 110°C

Vazio: \approx 0,5 milibar

Limite prático: Humidade relativa de 0,40% nos isolantes

4.7.3. Ensaio preliminares ao transformador pré-secagem

Antes de se avançar para o processo de secagem, há que perceber o estado atual do transformador a fim de se estabelecer um comparativo pré e pós-secagem - a forma de perceber se o resultado obtido é aceitável.

Desta forma há um conjunto de ensaios mínimos que deverão ser realizados, a saber:

- Resistência de isolamento dos enrolamentos;
- Capacidade e fator de dissipação dielétrica dos enrolamentos ($Tg \delta$);
- Ensaio físico-químico ao óleo isolante, principalmente teor de água e furânicos para avaliar a presença de celulose no óleo (indica já degradação do papel).

Os ensaios elétricos mencionados acima já foram descritos no ponto 3.3.1.2 desta dissertação, assim como os relativos ao óleo no subcapítulo 3.4.1.4.

4.7.4. Modo de procedimento

O processo de secagem é normalmente composto pelas seguintes fases:

- Fase de pré-secagem: aplicar vácuo ao transformador usando grupo de vácuo até atingir um nível interno de vácuo cerca de 5 mbar;
- Fase de aquecimento por “HOT-OIL-SPRAY”: aplicar ao transformador um spray de óleo quente, através de aspersores, colocados na tampa do transformador.
Para este efeito é utilizada uma pequena quantidade de óleo, que é posta em circulação, passando por um permutador de calor que aquece o óleo por método indireto e através de uma bomba de circulação o mesmo é injetado na cuba do transformador a secar, pelos aspersores;
- Fase de vácuo fino: aplicar vácuo ao transformador assegurado pelo grupo de vácuo até que os critérios de aceitação final sejam verificados.

4.7.5. Principais características do equipamento

- Capacidade mínima do grupo de vácuo: 1900 m³/h
- Capacidade de aquecimento do óleo para spray: 265 kW
- Bomba de circulação, com caudal mínimo de: 20 m³/h

4.7.6. Processo

Um dos critérios de paragem do spray é a temperatura da parte ativa do transformador. Na fase de preparação, é necessário prever o modo como se vai realizar o controlo de temperatura dentro do transformador.

Para máquinas pequenas (até 30 MVA, 60 kV) a temperatura pode ser controlada através de uma sonda de temperatura aplicada na parte ativa, em zona o mais possível protegida do spray direto de óleo (de modo a que a sonda possa medir a temperatura da parte ativa e não do spray de óleo usado para aquecimento)

Secagem da parte ativa de transformadores

Nas máquinas grandes ou sempre que a montagem da sonda se revele difícil (ou noutras circunstâncias) será feita uma medida indireta da temperatura do cobre através da medida de resistência a frio (antes do processo) e a quente (no final do spray) para se calcular, por forme indireta a temperatura média a que se encontra a bobinagem.

4.7.7. Preparação

- Antes de iniciar a secagem é necessário definir se a temperatura se vai medir através de sonda (e neste caso montar a sonda) ou através da medida da resistência. Para este último caso é necessário conhecer os valores da resistência óhmica dos enrolamentos AT e BT, a frio, para se poder avaliar a temperatura das bobinagens antes de terminar o spray. Caso não tenham sido feitos ensaios prévios, pelo menos, a medida da resistência óhmica é de particular importância, neste caso.
- Ligar as mangueiras flexíveis do óleo e vácuo entre a estação de secagem final e a cuba do transformador.
- A mangueira de vácuo, sempre que possível, deve ser ligada à abertura da válvula de descompressão da cuba do transformador ou no caso de não existir deverá ser ligada a qualquer porta de visita, com pelo menos 75 mm de diâmetro.
- A mangueira de enchimento e circulação, ligada à válvula de drenagem da cuba do transformador ou a outra válvula com diâmetro de pelo menos 75 mm.
- As mangueiras equipadas com grupos aspersores devem ser ligadas à tampa do transformador, nos furos apropriados sobre as fases ou, caso não existam, nos furos das travessias.
- A quantidade de aspersores pode variar entre 2 e 8, dependendo do tamanho do transformador e dos locais existentes para montagem. Nos transformadores com regulador em carga, sempre que possível, dever-se-á montar um aspersor na zona do regulador, para garantir o aquecimento da toalha de regulação.

As ligações acima estão asseguradas pelo aperto das flanges de aço e juntas de NBR¹⁷ - verificar a condição de aperto no início de cada secagem.

A bomba de circulação deve ser sempre colocada a um nível inferior do fundo da cuba, se possível a cerca de 500 mm, para garantir uma boa circulação do óleo e evitar fenómenos de cavitação.

¹⁷ A borracha nitrílica pertence à classe das borrachas especiais resistentes ao óleo e é um co polímero de butadieno e acrilonitrilo, sendo a polimerização feita por um processo de emulsão.

4.7.8. Arranque do processo

1. Iniciar o vácuo até atingir um nível de 5 mbar.
2. Introduzir óleo na cuba do transformador, através da válvula de drenagem até a um nível ligeiramente abaixo das fases do transformador, para que não haja cavitação da bomba de circulação.
3. Aquecer o óleo até uma temperatura de 80°C com um gradiente de 10°C/h através de circulação do óleo pelo permutador de calor.
4. Circulação do óleo entre a cuba do transformador e o aquecedor, vaporizando o interior da cuba a uma pressão de cerca de 2 Kg/cm² em cada aspersor. A pressão é regulada por válvulas de bypass.
5. Continuar a aquecer o óleo até uma temperatura de 110°C mantendo o gradiente de 10°C/h.
6. Fazer “HOT-OIL-SPRAY” com 110°C até atingir os critérios de paragem.

4.7.9. Fim do processo

1. Após atingir os critérios de paragem, drenagem total do óleo da cuba do transformador usando a bomba de circulação e mantendo o vácuo.
2. Vácuo final com a duração de 24 horas.

Nota: *Todo este procedimento carece de um grande cuidado em relação às pressões que devem ser aplicadas, bem como aos níveis de óleo e temperatura atingidos.*

4.7.10. Registo de variáveis

A cada hora deverão ser registados os seguintes valores:

- Vazio no grupo de bombas de vácuo (em mbar);
- Vazio na cuba do transformador (em mbar);
- Temperatura do óleo no aquecedor (em °C);
- Temperatura de óleo no transformador (em °C) (só no caso de uso de sonda de medida de temperatura);
- Temperatura do circuito magnético (em °C);
- Quantidade de água total e parcial removida (em litros);
- Tangente δ (%) entre cada enrolamento e os outros + massa;
- Capacidade dos enrolamentos, C (nF).

Secagem da parte ativa de transformadores

No caso em que não seja utilizada sonda de medida de temperatura dentro do transformador, antes de terminar a fase de spray, medir a temperatura média da parte ativa pelo método indireto, recorrendo à medida da resistência da bobinagem (se possível AT e BT) e calculando o valor médio da temperatura do cobre.

- Durante a vaporização com 110°C e na fase de vácuo final, comparar as características medidas com os critérios de aceitação para o fim do processo. Terminar cada processo somente quando as características medidas estiverem de acordo com o critério de aceitação final.

4.7.11. Implementação do processo

Para mais facilmente se entender todo o processo bem como toda a montagem do mesmo, apresentamos na última página um desenho e dá-se uma ideia dos seus componentes e da forma como são ligados.

Os elementos constituintes desta montagem são:

- Grupo de circulação e aquecimento de óleo, por método indireto;
- Elementos de aquecimento (aquecedores, incluindo permutador);
- Elementos de circulação (motor e bomba);
- Elementos de filtração (microfiltros);
- Grupo de vácuo.

É de notar que o grupo de vácuo apenas tem ligação à cuba. O grupo de vácuo é dotado de um condensador para se permitir a condensação do vapor e a medida da quantidade de água extraída.

Todos os elementos constituintes do grupo de aquecimento e circulação de óleo, estão ligados por mangueiras com diâmetro apropriado, em que antes e depois de qualquer um desses elementos encontram-se instaladas válvulas e manómetros de pressão.

As válvulas são instaladas com a finalidade de isolar cada um dos elementos e os manómetros com o objetivo de ser possível monitorizar a pressão em cada uma das partes.

Para que uma secagem tenha sucesso é necessário que a disposição dos aspersores seja feita de forma cuidada (obviamente atendendo às condicionantes de acessos ao transformador) e a pressão à saída destes tenha um valor próximo de 2 bar (Kg/cm²).

Secagem da parte ativa de transformadores

Os aspersores devem ser inspecionados antes de uma secagem precavendo-se contra a presença de partículas que possam causar um funcionamento deficiente.

→ Para termos uma pressão nos aspersores de cerca de 2 bar (kg/cm²) duas referências são levadas em linha de conta:

- os manómetros à saída da bomba, devem ser regulados para um valor próximo dos 3,5 bar (Kg/cm²), sendo esta pressão controlada através de válvulas de bypass.
- a pressão após o filtro deve ter um valor próximo dos 3 bar (Kg/cm²), sem ultrapassar. O controlo desta pressão é feito através dos Bypass que se fazem entre a saída do microfiltro e a entrada da bomba de circulação, através das válvulas de bypass.

Assim o valor a atingir nos manómetros dos aspersores será um valor muito próximo dos 2 Kg/cm², para garantir uma boa aspersão do óleo, em forma de vapor.

Neste sistema de aquecimento e circulação de óleo, há um outro bypass, este de vácuo entre a cuba do transformador e a entrada da bomba de circulação por forma a facilitar a circulação do óleo. Esta circulação é controlada através de uma outra válvula.

4.7.12. Critérios de aceitação

Os critérios de aceitação para que se considere a paragem do processo de aquecimento por spray de óleo quente são:

1. Fim do spray com 110°C

- Tang $\delta < 2\%$, com variação máxima durante as últimas 6h $< 1\%$;
- Extração de água durante as últimas 6h $< 1\text{Lt}$;
- Vácuo $< 2\text{mbar}$
- Temperatura média dos enrolamentos ou no circuito magnético $\geq 100\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Fim do processo de vácuo fino

- Extração de água durante as últimas 6h $< 1\text{Lt}$
- Tang $\delta < 0.6\%$
- Vácuo $< 1\text{mbar}$

Nota: Estes parâmetros são normalmente atingidos antes das 24 horas estabelecidas para esta fase. Por norma, nos transformadores de maiores dimensões (acima dos 50 MVA) o

Secagem da parte ativa de transformadores

enchimento só se inicia cerca de 24 horas após terminar o spray, para garantir a maior possível extração de humidade dos isolantes sólidos [5].

4.7.13. Ensaio ao transformador pós-secagem

De forma a verificar o sucesso da intervenção, são novamente realizados os seguintes ensaios de verificação:

- Medição da resistência de isolamento dos enrolamentos;
- Medição da capacidade e fator de dissipação dielétrica ($\text{tg}\delta$) dos enrolamentos;
- Após secagem e enchimento do transformador com óleo previamente tratado, é feita uma recolha de amostra de óleo para realização de provas físico-químicas em laboratório.

Os valores mínimos aceites de acordo com as regras de arte praticadas na EFACEC são os representados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Valores mínimos dos critérios de aceitação pós-secagem

ENSAIO DE VERIFICAÇÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DOS ENROLAMENTOS	>1000 M Ω
Fator de dissipação dielétrica dos enrolamentos ($\text{tg}\delta$)	$\leq 0,5\%$
Teor de água no óleo	$\leq 5\text{ppm}$
Tensão disruptiva do óleo	>70kV

4.7.14. Exemplificação do sistema

Na figura 4.8 está representado todo o sistema de secagem pelo método HOS, e é descrita a legenda de cada secção que o compõe.

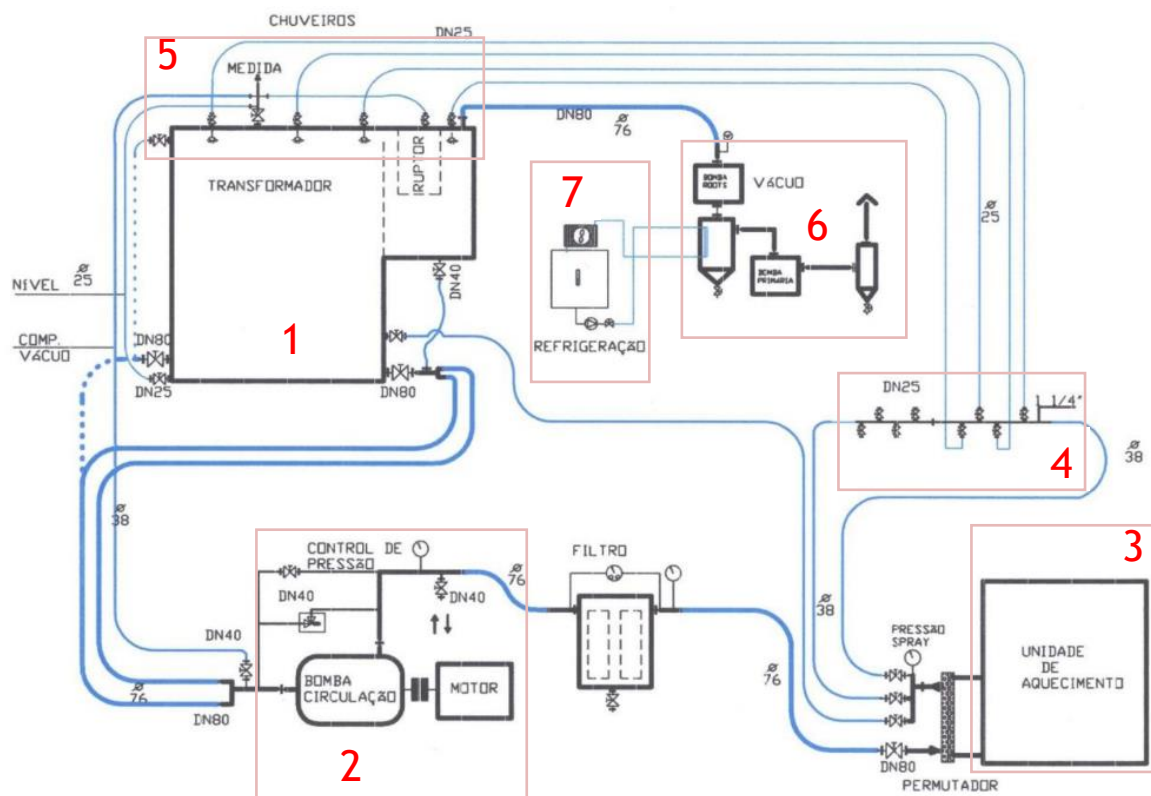


Figura 4.8 - Diagrama geral do sistema de secagem por H.O.S.

Legenda e explicação da figura 4.8:

1. TRANSFORMADOR

No transformador é colocada somente a quantidade de óleo necessária para a realização da circulação, sem nunca que esse nível de óleo possa tocar os isolantes, ou seja, fica somente no fundo da cuba.

Se o óleo tocar nos isolantes sólidos, isso irá prejudicar a libertação da humidade que possam conter no seu interior, ou seja, afeta o coeficiente de difusão.

2. BOMBA DE CIRCULAÇÃO DE ÓLEO

Esta bomba é ligada à válvula inferior do transformador e irá ser responsável por toda a circulação do óleo no sistema e regulação da pressão.

3. AQUECEDOR

Unidade de aquecimento de óleo por meio de permutação de calor.

4. COLETOR/DISTRIBUIDOR

Recebe o óleo vindo já aquecido e distribui pelos diferentes chuveiros.

5. CHUVEIROS

Colocados estrategicamente de forma a distribuir o mais uniformemente possível o óleo por toda a parte ativa. Normalmente dispostos, se possível, na direção das bobinas.

6. BOMBA DE VÁCUO

Responsável por fazer vácuo ao transformador durante todo o processo de secagem. É o sítio pelo qual a humidade é expelida.

7. CONDENSADOR

Colocado á saída do escape da bomba de vácuo para condensar o ar de forma a se poder contabilizar a água retirada da parte ativa.

4.7.15. Equipamentos

4.7.15.1. Aquecedor

Marca: Heiza

Modelo: HW-NE08

Alimentação: 400V - 50Hz

Temperatura máxima: 200°C

Potência: 230 kW

Caudal termofluido: 24m³/h

Secagem da parte ativa de transformadores



Figura 4.9 - Vista geral da máquina de secagem contentorizada.

4.7.15.2. Bomba de circulação

Caudal: 1 - 35m³/h

Elevação máxima de caudal: 354 m

Rotação máxima: 1800 rpm

Temperatura máxima: 80° C

PN: 40 bar

Tensão de operação: 400VAC



Figura 4.10 - Bomba de circulação de óleo.

Secagem da parte ativa de transformadores

4.7.15.3. Aspersores/Pulverizadores de óleo

Os pulverizadores de óleo instalados dentro da cuba do transformador são da Spraying Systems Co. e normalmente são usados aspersores de duas dimensões, 2.500L/hora e 5.000L/hora a uma pressão de 2bar.

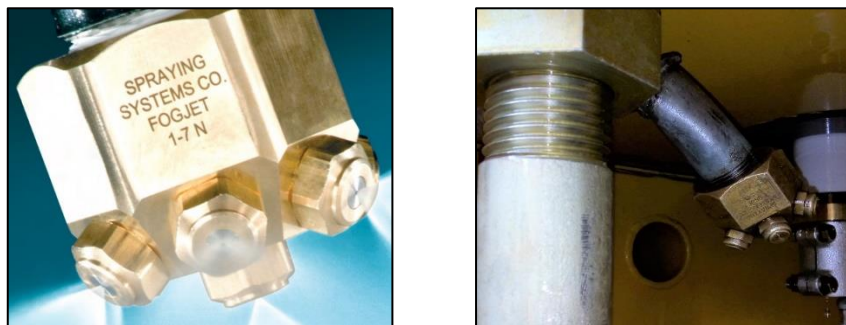


Figura 4.11 - Pulverizadores de óleo de 2.500L/h.

4.7.15.4. Grupo de vácuo

Marca: Edwards

Modelo: EH2600

Caudal: 1.300m³/h

Temperatura máxima de operação: 200°C



Figura 4.12 - Grupo de vácuo da Edwards.

4.7.15.5. Leitores de pressão e temperatura

Os valores medidos continuamente durante o processo de secagem são:

- Temperatura do termofluido e do óleo de circulação, diretamente no secador;
- Temperatura do circuito magnético através de uma sonda K;
- Valor de vácuo, na saída do grupo de vácuo e dentro da cuba do transformador;
- Pressão de óleo na saída do secador e em cada um dos aspersores;



Figura 4.13 - Painel do secador com os indicadores de temperatura.



Figura 4.14 - Sonda K ligada a um multímetro com função de leitura de temperatura.



Figura 4.15 - Sonda de leitura de vácuo Leybold Thermovac TR211 instalada na cuba do transformador e respectivo leitor Leybold Display Two.

5. Solução Técnica Desenvolvida

Neste capítulo é apresentada a solução que foi desenvolvida e a sua implementação num contexto real. Serão demonstrados todos os passos e elementos que constituem o sistema de monitorização e data logging, nomeadamente o conjunto de componentes escolhidos, uma visão geral do código programado para a presente aplicação e a apresentação de dois casos reais como teste de validação da solução e sua análise.

5.1. Definição das variáveis a monitorizar

De acordo com o já exposto no capítulo 4 do presente trabalho, há um conjunto de variáveis que são importantes de serem controladas e daí a necessidade de monitorização de forma a termos a certeza de que o processo de secagem decorreu com sucesso.

Estas variáveis, nomeadamente as que foram expostas no ponto 4.7.11, são a globalidade de valores que normalmente se controlam durante todo o processo, mas de entre todas, existem seis delas que compõe os elementos necessários para validar uma secagem por HOS e que compõe o relatório de controlo do processo, daí o sistema que foi desenvolvido ter-se focado na monitorização e registo dessas variáveis, sendo elas:

- Temperatura do termo fluido do aquecedor (°C)
- Temperatura do óleo de circulação (°C)
- Temperatura do circuito magnético (°C)
- Pressão do circuito do óleo de circulação (bar)
- Vácuo dentro da cuba do transformador (mbar)
- Volume de água retirado (L)

Estas variáveis são lidas durante todo o processo de secagem, através de sensores colocados ao longo do circuito de circulação do óleo, e câmara de vácuo composta pela cuba do transformador. Resumindo o já exposto, o óleo de circulação é aquecido indiretamente através do óleo do termofluido, dentro de um permutador, e conduzido a diversos aspersores colocados dentro da cuba do transformador. O óleo do termofluido pode chegar aos 125°C ,e idealmente, a temperatura do óleo de circulação deverá acabar por estabilizar em torno do mesmo valor, dependendo das perdas de calor ao longo das tubagens e da temperatura ambiente exterior.

Solução Técnica Desenvolvida

Ao mesmo tempo que o óleo circula, está a ser medido o vácuo dentro da cuba, que normalmente, e dependendo do tamanho do transformador, deverá atingir um valor igual ou inferior a 5mbar até ao momento antes da paragem do aquecimento e, idealmente abaixo de 1mbar após o período de vácuo fino.

A pressão do circuito de óleo de circulação á saída do aquecedor deve estar entre os 2,5 a 3bar, de forma a garantir mesmo com perdas ao longo do circuito, que nos aspersores tenhamos 2bar.

O volume de água depende inteiramente do estado em que se encontram os isolantes sólidos internos do transformador e claro está, o seu tamanho. Na figura 5.1, apresenta-se um diagrama geral do sistema de secagem e as variáveis mais importantes a considerar.

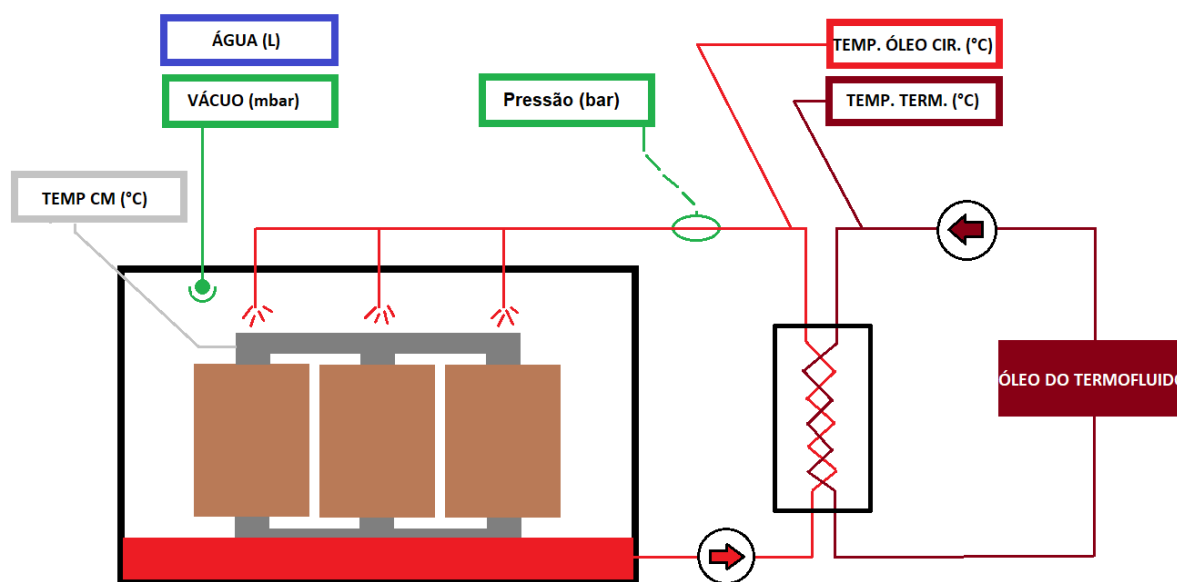


Figura 5.1 - Diagrama do sistema de secagem e variáveis a serem medidas pelo equipamento

5.2. Hardware utilizado

Apresentam-se de seguida os diferentes constituintes da solução desenvolvida usados para a implementação do sistema.

5.2.1. Processamento e controlo - Arduino UNO

Para a aquisição de sinais, leitura e processamento das variáveis foi dada importância ao fator simplicidade de implementação, dimensão e custo. Por isso foi desde o início do trabalho escolhido como controlador um Arduino, modelo Uno, dado que possui um número de entradas e saídas tanto analógicas como digitais suficientes para o âmbito deste trabalho.

Recorrer ao Arduino foi uma decisão prática que permite o desenvolvimento de um modelo mais rapidamente e que pode sempre ser aberto a evolução com adição de mais funcionalidades, até ao limite de memória que o microcontrolador permitir.



Figura 5.2 - Placa de prototipagem Arduino Uno

O microcontrolador que o constitui é da Atmel¹⁸, nomeadamente um ATmega328 de 8bits.

A placa Arduino Uno possui pinos de entrada e saídas digitais, assim como pinos de entradas e saídas analógicas. No total possui 14 pinos que podem ser usados como entrada ou saída digitais.

Estes Pinos operam a uma tensão máxima de 5 VDC, onde cada pino pode fornecer ou receber uma corrente máxima de 40 mA. Cada pino possui uma resistência de pull-up interno que pode ser habilitada por software.

¹⁸ A Atmel Corporation é uma produtora de semicondutores, fundada em 1984.

Alguns desses pinos possuem funções especiais:

- PWM : 3,5,6,9,10 e 11 podem ser usados como saídas PWM de 8 bits através da função analogWrite();
- Comunicação série: 0 e 1 podem ser utilizados para comunicação série. Deve-se observar que estes pinos são ligados ao microcontrolador responsável pela comunicação USB com o PC;
- Interrupção externa: 2 e 3. Estes pinos podem ser configurados para gerar uma interrupção externa, através da função attachInterrupt()

Para interface com o mundo analógico, a placa possui 6 entradas, onde cada uma tem a resolução de 10 bits. Por padrão, a referência do conversor AD¹⁹ está ligada internamente a 5V, ou seja, quando a entrada estiver com 5V o valor da conversão analógica digital será 1023. O valor da referência pode ser mudado através do pino AREF.

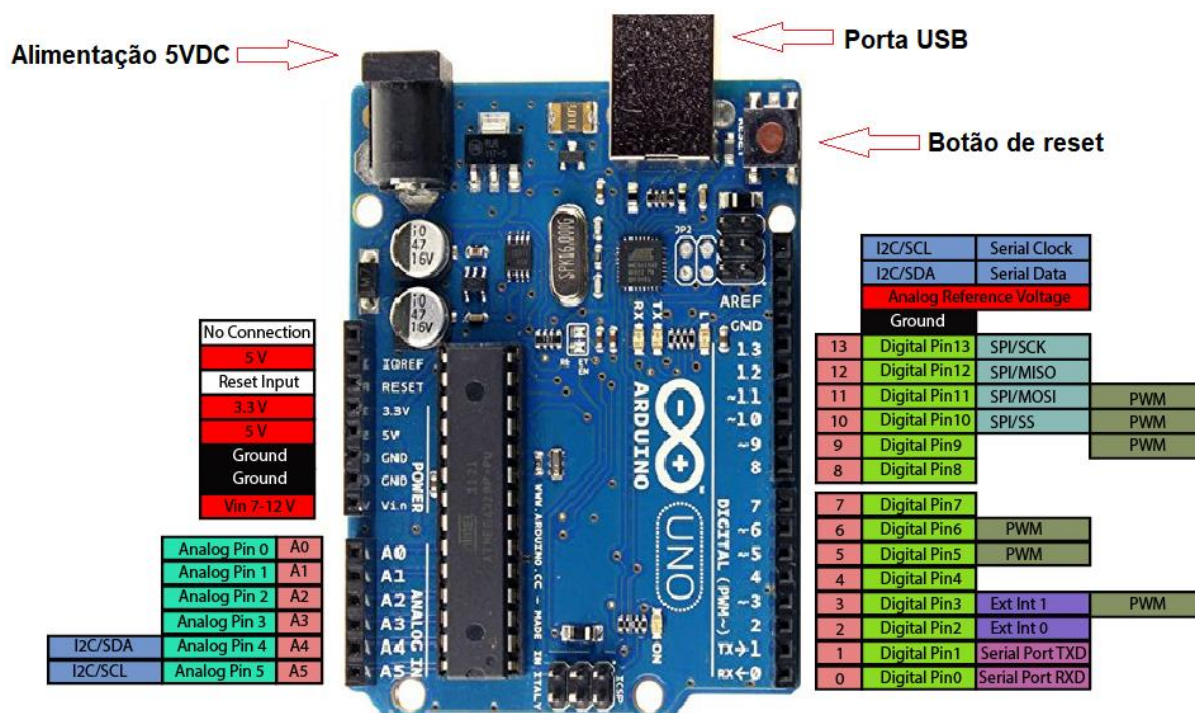


Figura 5.3 - Resumo dos pinos da placa Arduino Uno (www.theengineeringprojects.com)

¹⁹ AD – Analógica/Digital

5.2.2. Aquisição de sinais - Sensores de temperatura

Das variáveis que se pretendem serem monitorizadas, três são respeitantes a temperaturas, conforme mencionado no início do presente capítulo. Dessas três, duas serão relativas à temperatura de fluidos, nomeadamente o termofluido do aquecedor e o óleo de aquecimento, que circulará em circuito fechado entre o aquecedor e a cuba do transformador.

Para estas duas optou-se por usar RTD's²⁰, ou mais especificamente neste trabalho, duas PT100, que são termo resistências em que o seu material constituinte é a platina. Por exemplo, uma Pt-100 será uma termorresistência de platina que a 0 °C apresenta uma resistência de 100 Ω.

Estes tipos de sensores são ideais para instalação por imersão ou montados na superfície dum recipiente. No caso prático do presente trabalho serão instalados diretamente nas tubagens de circulação de óleo.

Foram usadas duas PT100 genéricas, iguais às exemplificadas na figura 5.3. De forma a manter os custos reduzidos recorreram-se a sensores de marca branca.



Figura 5.4 - Termo resistência PT100 NPT de 1/2 polegada com conector destacável

²⁰ RTD – do Inglês Resistance Temperature Detector, é um tipo de sensor que permite conhecer a temperatura do meio ambiente, recorrendo à relação entre a resistência elétrica de um material e a sua temperatura.

Na tabela 5.1. apresentam-se as características das PT100 usadas no presente trabalho:

Tabela 5.1 - Especificação das PT100

Temperatura de operação	-50 ~ 500 C (-50 ~ 930 Fahrenheit)
Comprimento da sonda	50mm (2 ")
Diâmetro	5mm (0,2 ")
Tamanho da rosca	1/2 "NPT
Material da sonda	Aço Inoxidável 304
Material dos condutores	Cobre estanhado
Comprimento do cabo	2m (6,6 ')
Bainha do cabo	3 fios de fibra de vidro trançado com aço inoxidável
Conector	Conector destacável de 4 pinos

Apesar das PT100 terem um comportamento bastante estável e serem muito precisas, para obter essa precisão e exatidão deve ser usado um amplificador projetado para ler a baixa resistência. Melhor ainda, ter um amplificador que possa ajustar e compensar automaticamente a resistência dos fios de ligação entre a PT100 e os terminais.

Neste sentido, e tendo em vista uma solução facilmente integrável no projeto que ao mesmo tempo seja económica, optou-se por usar dois amplificadores de sinal da Adafruit equipados com um integrado MAX31865²¹, exemplificados na figura 5.4.

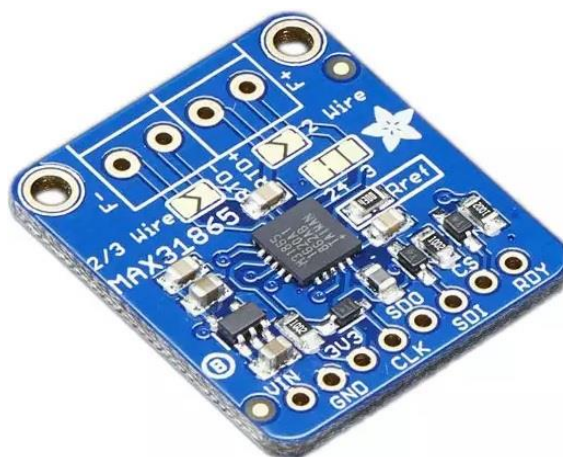


Figura 5.5 - Amplificador de sinal para PT100

²¹ O MAX31865 é um conversor de resistência digital da Maxim Integrated, otimizado para usar com PT100. Uma resistência externa ajusta a sensibilidade para o RTD em uso e um ADC de precisão converte a razão da resistência do RTD para a resistência de referência em formato digital.

Tabela 5.2 - Especificação dos amplificadores de sinal PT100

Tipo de sensor	Temperatura
Tensão nominal de entrada	3.3 / 5VDC
Interface	Digital
Protocolo de comunicação	SPI

A terceira variável de temperatura é a respeitante á temperatura do circuito magnético dentro da cuba do transformador.

Para medir esta grandeza nas condições adversas inerentes a uma secagem, o sensor deveria ser altamente resistente á temperatura, fiável e resistente ao vácuo. Desta forma recorreu-se a uma sonda de temperatura do tipo termopar²².



Figura 5.6 - Exemplo de sonda termopar

Termopares são sensores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura. Um termopar é constituído de dois metais distintos unidos numa das extremidades. Quando há uma diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres, verifica-se o surgimento de uma diferença de potencial que pode ser medida por um voltímetro.

No caso concreto deste trabalho, deu-se uso a uma sonda termopar do tipo K. O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade

²² Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu acidentalmente que a junção de dois metais gera uma tensão elétrica em função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenómeno, que é conhecido como Efeito de Seebeck.

estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente 41µV/°C

Tabela 5.3 - Especificação do termopar tipo K usado

Tipo de termopar	K
Termo elemento positivo (KP)	Ni90%Cr10% (Cromel)
Termo elemento negativo (KN)	Ni95%Mn2%Si1%Al2% (Alumel)
Faixa de utilização	-270 °C a 1200 °C
f.e.m. produzida	-6,458 mV a 48,838 mV

Tal como no caso das PT100, de forma a obter melhores resultados de medida, não se poderia medir o termopar diretamente nas entradas do Arduino, por isso recorreu-se ao integrado da Maxim MAX6675.

O MAX6675 executa compensação de junção fria²³ e digitaliza o sinal de um termopar tipo K. Os dados são gerados num formato de leitura compatível com SPI²⁴ com resolução de 12 bits.

Este conversor tem uma resolução de 0,25°C, permite leituras tão altas quanto +1024°C e exibe com precisão de 8bits a temperatura do termopar para temperaturas que variam de 0°C a + 700°C.



Figura 5.7 - Módulo de leitura de termopar com MAX6675, usado no projeto

²³ Não basta ligar um voltímetro ao termopar e registrar o valor da tensão produzida, uma vez que ao ligarmos o voltímetro estamos a criar uma segunda, e indesejada, junção no termopar. Para se fazerem medições exatas devemos compensar este efeito, o que é feito recorrendo a uma técnica conhecida por compensação por junção fria (0 °C).

²⁴ SPI (Serial Peripheral Interface) é um protocolo de comunicação série síncrono, usado pelos microcontroladores para se comunicar com um ou mais dispositivos periféricos rapidamente em curtas distâncias.

5.2.3. Aquisição de sinais - Sensor de pressão

Para a medida da pressão do circuito do óleo de circulação entre o aquecedor e a cuba do transformador, deu-se uso a um transdutor de pressão industrial.

Tal como a grande maioria dos sensores usados na indústria, este tem uma escala de corrente de saída de 4 - 20mA ou saída em tensão na escala de 0 - 10VDC. Dado que na aplicação em causa a pressão desta variável não deverá exceder neste ponto do circuito 3bar, optou-se por um para pressões até 10bar.

O sensor usado foi um S-10 da Wika.

Tabela 5.4 - Especificações do sensor de pressão

Faixas de medição	0 ... 0,1bar – 0 ... 1,000bar
Não linearidade	0,2% do fundo de escala (BFSL)
Sinais de saída	4 ... 20mA ; 0 ...10VDC
Tensão de alimentação	24VDC



Figura 5.8 - Sensor de pressão WIKA S-10, usado no projeto

Como o Arduino não lê diretamente em corrente e dado que o sensor apresenta saída de 10VDC e as entradas analógicas do Arduino somente suportam um máximo de 5VDC, optou-se por usar uma placa para medição de loops de corrente de 4-20mA já existente, da marca Itead, que tem a vantagem de se poder alimentar em 5VDC e ele internamente possuir um

Solução Técnica Desenvolvida

circuito DC-DC que amplifica os 5 volts para os 24VDC, necessários á alimentação do próprio sensor.

Além do mais, pode ser usado para ligar dois sensores distintos ao mesmo tempo, o que no caso do presente trabalho permitiu ligar o transdutor de pressão e o sensor de distância, que iremos apresentar mais abaixo, usado para quantificar a água extraída na secagem.



Figura 5.9 - Módulo de medição de loops de corrente da ITEAD, usado no projeto

Tabela 5.5 - Especificações do módulo de medição de loops de corrente da ITEAD

Loops de corrente permitidos	Tipo 2, 3 e 4
Corrente de saída (DC/DC)	150mA
Corrente de entrada	4 ... 20mA
Tensão de alimentação	5VDC

Na prática, com este módulo consegue-se receber o loop de corrente gerado pelos sensores e passá-los para saídas em tensão proporcionais (0-5VDC) que podem ser ligadas não entradas analógicas do Arduino.

5.2.4. Aquisição de sinais - Sensor ultrassónico

Para quantificar o volume de água extraído durante o processo de secagem existem variadas formas, incluindo soluções no mercado já adaptadas a esta aplicação, contudo, e de forma a tornar o trabalho passível de melhoramentos no futuro e aplicabilidade a diferentes contextos, decidiu-se recorrer a um sensor ultrassónico (sensor de distância) da Pepperl + Fuchs, modelo UC2000-30GM-E6R2-V15.

Solução Técnica Desenvolvida

Este sensor consegue medir distâncias com precisão de 80mm até 2000mm, transmitindo um sinal analógico em corrente de 4 - 20mA ou tensão 0 - 10VDC.

Por ser mais prático e possuir maior imunidade a ruído recorreu-se à saída em corrente que poderá ser usada no módulo de medição de loops de corrente da Itead, mencionado no ponto anterior.

A ideia é usar o sensor para medir a distância do seu ponto de fixação, que pode ser no topo de um recipiente aonde está a ser recolhida a água da secagem, até ao nível da água que conforme vai aumentando vai diminuindo a distância à cabeça do sensor.

Se o recipiente for cilíndrico pode-se recorrer à fórmula do volume de água, em que a variável a medir é a altura (h).

$$V_{\text{cilindro}} = \Pi \times r^2 \times h \quad (5.1)$$



Figura 5.10 - Sensor ultrassónico UC2000-30GM-E6R2-V15 da Pepperl + Fuchs

Tabela 5.6 - Especificações do sensor ultrassónico UC2000, usado no trabalho

Alcance de medição	80 ... 2000mm
Frequência do transdutor	180khz
Temperaturas de funcionamento	-25°C – 70°C
Tensão de alimentação	10 - 30VDC
Saída	4...20mA; 0...10VDC

5.2.5. Aquisição de sinais - Vácuo

Para a medição do valor de vácuo, não existem no mercado sensores que possam ser ligados diretamente às entradas do Arduino por isso recorreu-se a uma solução que já era usada na

Solução Técnica Desenvolvida

EFACEC, um sensor industrial da Inficon ligado a um condicionador de sinal da Leybold Display One.



Figura 5.11 - Sensor de vácuo Inficon PSG e display condicionador sinal Leybold display one

Como este condicionador possui uma saída em tensão de 0 - 10VDC foi necessário fazer um pequeno circuito divisor de tensão antes de ligar a entrada no Arduino.

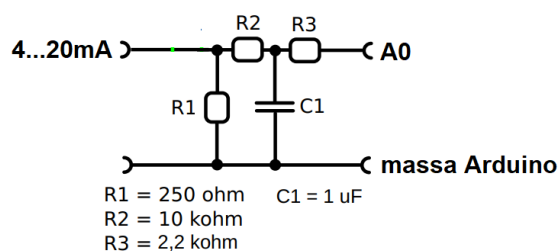


Figura 5.12 - Divisor de tensão usado na entrada da porta A0 do Arduino

Na tabela 5.7 estão indicadas as características do sensor de vácuo.

Tabela 5.7 - Especificações do sensor de vácuo Inficon PSG500, usado no trabalho

Alcance de medição	5x10 ⁻⁴ ... 1000mbar
Tempo de resposta	80ms
Faixa a tensão de medida	1,9 ... 10VDC
Resolução	1% da medida
Tensão vs. pressão	Logarítmica 1.286V/década

5.2.6. Visualização das variáveis - HMI

De forma a visualizar em tempo real as diferentes variáveis, pensou-se usar um HMI (Human Machine Interface). Dos existentes no mercado e mais acessíveis e configuráveis com o Arduino, temos os da Nextion.

No presente trabalho deu-se uso a um Nextion NX4827T043 de 4.3 polegadas.

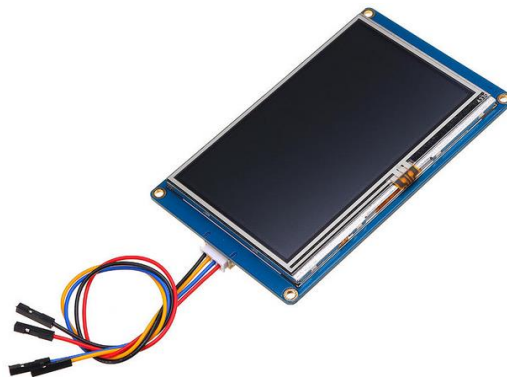


Figura 5.13 - HMI da Nextion usado no projecto

Este modelo necessita apenas de 4 condutores para funcionar, basicamente alimentação a 5VDC e um condutor TX e outro RX para comunicação com o Arduino. A própria Nextion possui um editor o Nextion Editor LTS com o qual se pode programar o display.

5.2.7. Registo de valores - Data Logging

De forma a registar o valor das variáveis para posterior tratamento num computador, optou-se por usar um módulo gravador de cartões de memória do tipo micro SD.

Consome apenas mais uma entrada digital do Arduino, e garante que não haja perda dos dados. Trabalha tal como os outros módulos usados com protocolo SPI.



Figura 5.14 - Módulo de cartão micro SD genérico usado

5.2.8. Alimentação do sistema

O Arduino UNO é limitado a um total de 200mA de corrente a serem absorvidos pelos pinos de entrada e pelo próprio Atmega.

Dado que neste projeto temos seis sensores em que cinco são alimentados diretamente pelo Arduino, não seria possível evitar danificar o microcontrolador sem utilizar uma fonte de alimentação externa. Dessa forma, utilizou-se uma simples fonte comutável AC/DC 230VAC/5VDC (6A).



Figura 5.15 - Fonte de alimentação comutável AC/DC 5V, usada no projeto

5.3. Montagem do protótipo

Depois de escolhidos todos os componentes, definiram-se as entradas a utilizar no Arduino e começaram-se a criar as placas de aquisição de dados.

Por uma questão de separação de entradas, agregaram-se os sinais digitais e os analógicos em placas separadas.

As entradas utilizadas no Arduino UNO estão representadas na figura 5.16.

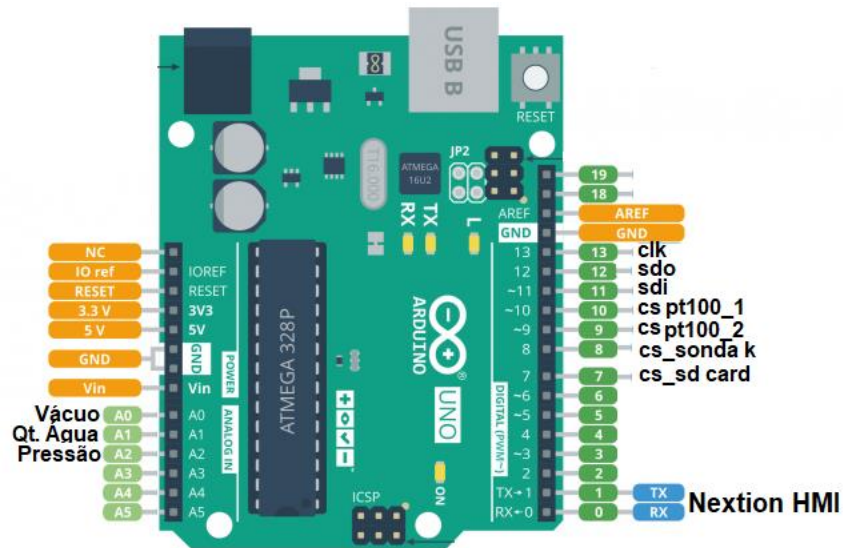


Figura 5.16 - Entradas utilizadas para aquisição dos dados

5.3.2. Placa de entradas digitais

Concentrados na placa de aquisição digital, ficaram as três variáveis de temperatura, e isso deu origem ao seguinte componente demonstrado na figura 5.17:

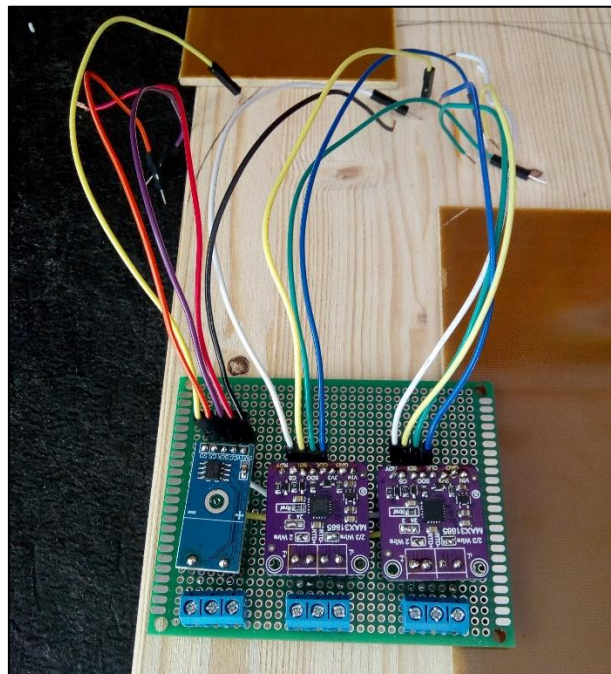


Figura 5.17 - Placa de aquisição de temperaturas (da esquerda para a direita, sonda K, PT100_1, PT100_2)

Solução Técnica Desenvolvida

No processo de ensaio dos sensores de temperatura, usou-se um multímetro Fluke 179 para aferir os valores e comparar com os que estavam a ser lidos pelo arduino, tal como referenciado na figura 5.18:

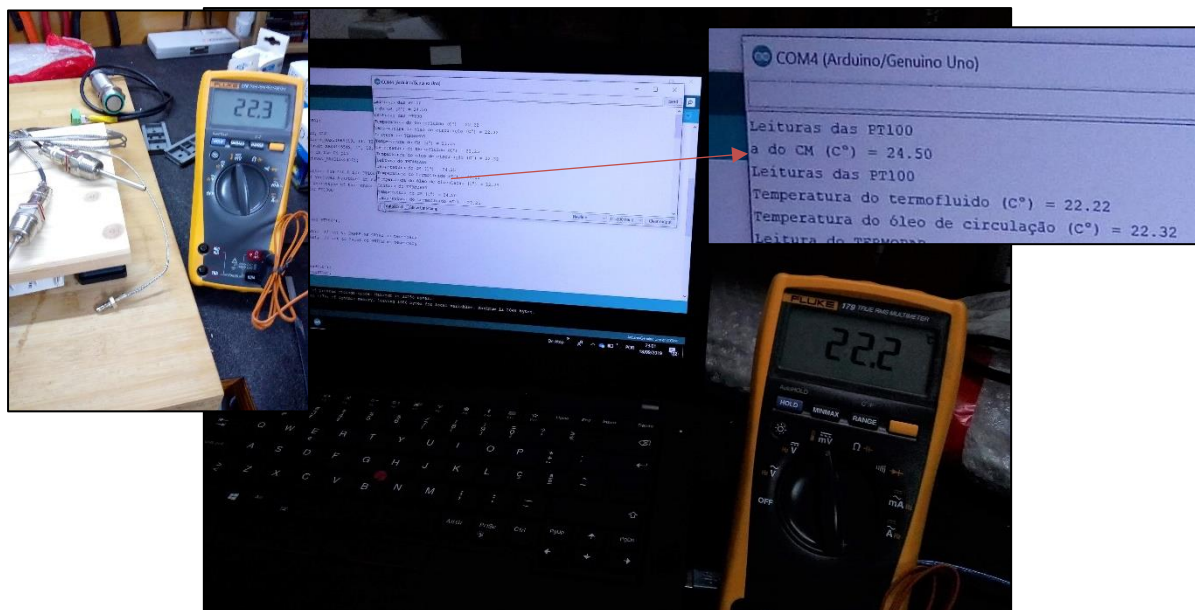


Figura 5.18 - Aferição dos valores medidos das temperaturas

5.3.3. Placa de entradas analógicas

Concentrados na placa de aquisição analógica, ficaram as variáveis da pressão do circuito de óleo, do volume de água e o vácuo na cuba do transformador, dando origem ao seguinte componente demonstrado na figura 5.19:

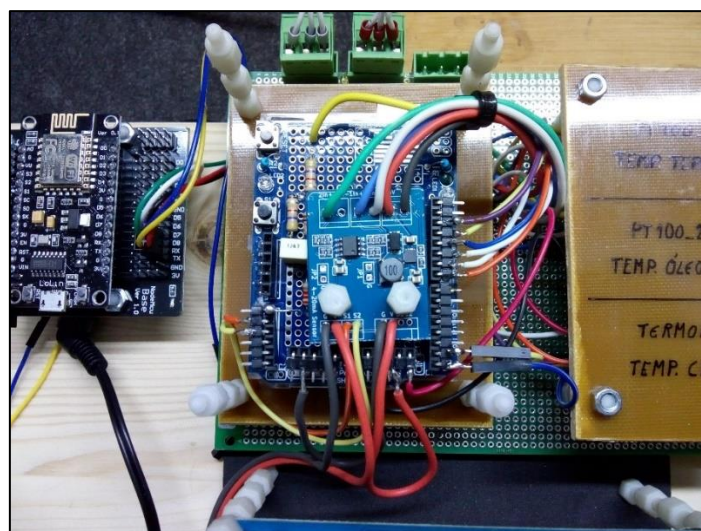


Figura 5.19 - Placa de aquisição de variáveis para entradas analógicas

Solução Técnica Desenvolvida

O módulo de aquisição completo, já com os sensores ligados e testados pode-se ver nas figuras 5.20 e 5.21:

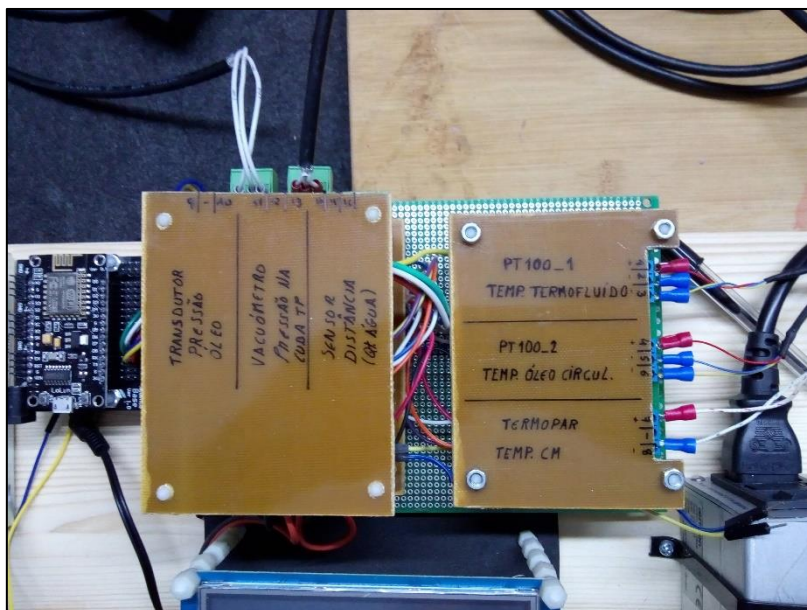


Figura 5.20 - Módulo completo com Arduino Uno e sensores acoplados



Figura 5.21 - Protótipo completo após ensaios

5.4. Desenvolvimento do código e interface

O ambiente de desenvolvimento usado para programar foi o Arduino IDE versão 1.8.10, que é open source e extremamente leve. Pode ser transferido diretamente em www.arduino.cc/en/Main/software.

O código principal desenvolvido não será exposto no corpo deste capítulo, mas pode ser consultado no anexo da dissertação, assim como todas as bibliotecas e parâmetros da interface.

O código principal está comentado para que seja praticamente autoexplicativo e de fácil interpretação. Na imagem 5.22 está exemplificada a janela do IDE do Arduino com o início do programa.



```
File Edit Sketch Tools Help
WIP_Teste_Moises_ANTES_DE_GUI
1 // *
2 AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DA PARTE ACTIVA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PELO MÉTODO HOS - HOT OIL SPRAY
3 PROGRAMA DE DATALOGING E CONTROLO
4
5 MOISÉS SILVA
6 ISEP 2019
7 */
8
9 //***TERMOPAR TEMPERATURA DO CM***
10 // CARREGAMENTO DA BIBLIOTECA DO CAPTADOR MAX6675
11 // DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS
12 #include <Adafruit_MAX31865.h>
13 #include "max6675.h"
14
15 int ktcSO = 12;
16 int ktcCS = 8;
17 int ktcCLK = 13;
18 MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
19
20 //
21
22 //***PT100 ÓLEO DE CIRCULAÇÃO E TERMOFLUIDO***
23 // ESTE SENSOR USA SPI PARA COMUNICAR, SÃO NECESSÁRIOS 4 PINOS PARA LIGAÇÃO
24 // CARREGAMENTO DA BIBLIOTECA DO CAPTADOR MAX31865
25 // DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS
26
27 // Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
```

Figura 5.22 - Início do código na janela do IDE

Para a criação da interface gráfica foi usado o ambiente de desenvolvimento Nextion Editor, na sua última versão 0.58. É também gratuito e pode ser transferido do endereço <https://nextion.tech/nextion-editor-ver-0-58/>.

Nas figuras 5.23 e 5.24, estão representadas as janelas do interface na sua inicialização e durante o desenvolvimento do interface principal do programa.

Solução Técnica Desenvolvida



Figura 5.23 - IDE de desenvolvimento dos displays Nextion

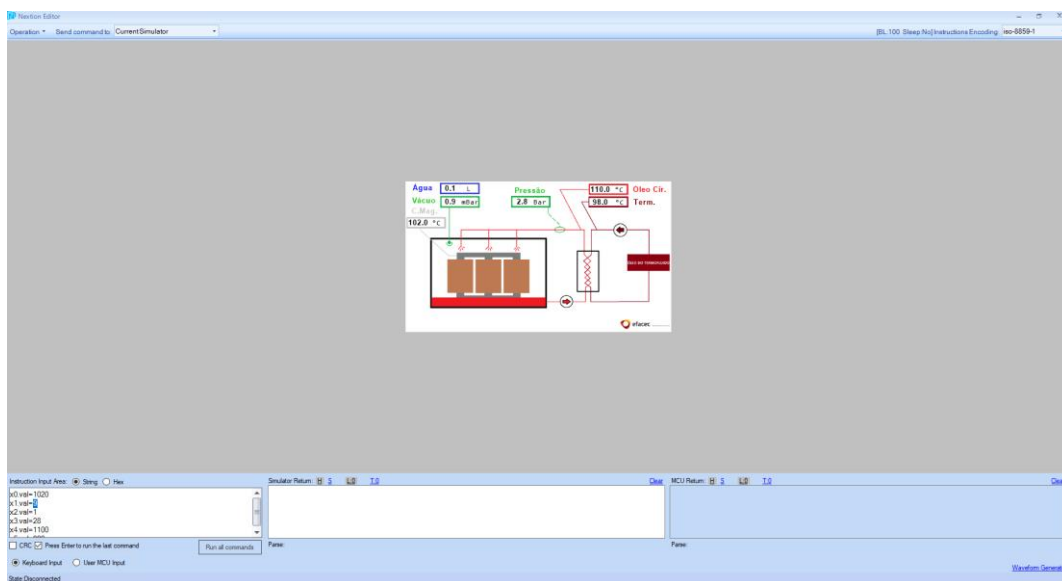


Figura 5.24 - Desenvolvimento do ecrã inicial da HMI

5.5. Implementação

Após validação do sistema, implementou-se numa situação real aquando a secagem por HOS de um transformador na fábrica da EFACEC.

Esta secagem teve início no dia 15/07/2019.

5.5.1. Montagem do sistema

Transformador Trifásico tipo Concêntrico

Fabricante: EFACEC

Número de serie: C-14819

Ano de construção: 1998

Tipo de refrigeração: ONAF

Potência Nominal: 75 MVA

Tensão Nominal: 220 / 71 kV

Corrente Nominal: 197A (AT) 610A (MT)

Frequência: 50 Hz

Grupo de ligação: YNyn0 (d1)

Regulação: Regulação em carga, no enrolamento da AT (17 pos.)



Figura 5.25 - Encubagem da parte ativa antes da secagem

Solução Técnica Desenvolvida



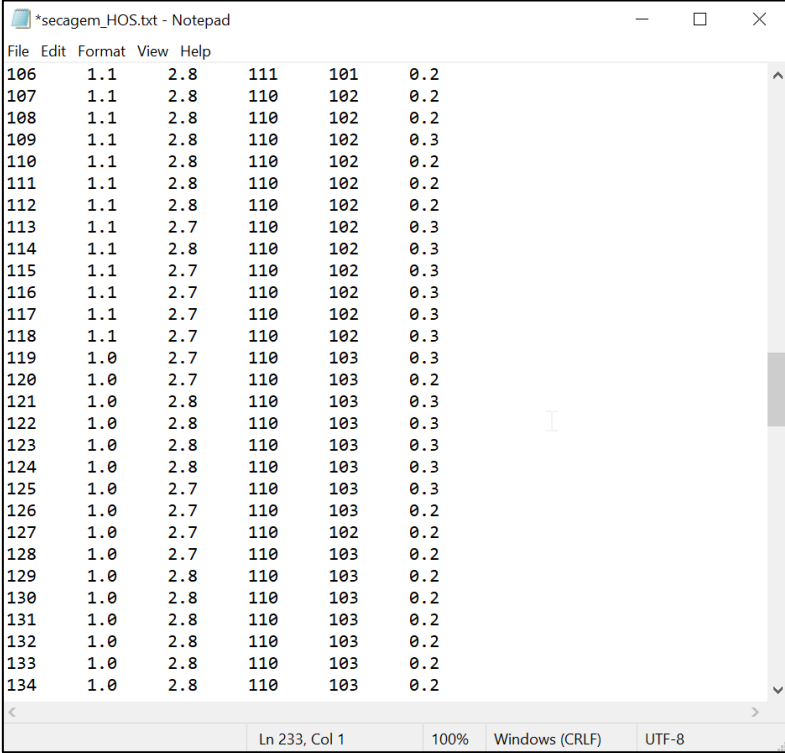
Figura 5.26 - Montagem dos sprays para o circuito do óleo de circulação



Figura 5.27 - Circuito de vazio e bomba de circulação de óleo

5.5.2. Valores registados

Após o final da secagem, retirou-se o cartão de memória do Arduino e os valores são apresentados de acordo com a seguinte matriz num ficheiro .txt:



Line	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6
106	1.1	2.8	111	101	0.2	
107	1.1	2.8	110	102	0.2	
108	1.1	2.8	110	102	0.2	
109	1.1	2.8	110	102	0.3	
110	1.1	2.8	110	102	0.2	
111	1.1	2.8	110	102	0.2	
112	1.1	2.8	110	102	0.2	
113	1.1	2.7	110	102	0.3	
114	1.1	2.8	110	102	0.3	
115	1.1	2.7	110	102	0.3	
116	1.1	2.7	110	102	0.3	
117	1.1	2.7	110	102	0.3	
118	1.1	2.7	110	102	0.3	
119	1.0	2.7	110	103	0.3	
120	1.0	2.7	110	103	0.2	
121	1.0	2.8	110	103	0.3	
122	1.0	2.8	110	103	0.3	
123	1.0	2.8	110	103	0.3	
124	1.0	2.8	110	103	0.3	
125	1.0	2.7	110	103	0.3	
126	1.0	2.7	110	103	0.2	
127	1.0	2.7	110	102	0.2	
128	1.0	2.7	110	103	0.2	
129	1.0	2.8	110	103	0.2	
130	1.0	2.8	110	103	0.2	
131	1.0	2.8	110	103	0.2	
132	1.0	2.8	110	103	0.2	
133	1.0	2.8	110	103	0.2	
134	1.0	2.8	110	103	0.2	

Figura 5.28 - Dados registados pelo Arduino a cada hora e gravados no cartão SD

Sendo que, a cada coluna corresponde o valor lido em cada sensor (excluindo a primeira), nomeadamente:

- 1ª coluna → incremento das horas
- 2ª coluna → vácuo na cuba do transformador (mbar)
- 3ª coluna → pressão do circuito de óleo de circulação (bar)
- 4ª coluna → temperatura do óleo de circulação (°C)
- 5ª coluna → temperatura do circuito magnético (°C)
- 6ª coluna → água retirada (L)

Solução Técnica Desenvolvida

Passando os valores para uma folha pré formatada no Microsoft Excel, basta colar os valores pela sequência com que estão na matriz do cartão e ficamos com a seguinte tabela 5.8:

Tabela 5.8 - Valores registados pelo sistema durante o processo de secagem

COLAR VALORES
"secagem_HOS.txt"

Dia	hora	Horas Acumulado	Vazio	Pressão	Temp.	Temp.	H2O	H2O
			TP (mbar)	Óleo (bar)	Óleo Circ. (°C)	CM (°C)	Parcial (L)	Acumulada (L)
15/07/2019	18:00	1	1000.0	0.0	17	15	0.0	0.0
	19:00	2	2.9	0.0	17	15	0.0	0.0
	20:00	3	2.9	0.0	17	16	0.0	0.0
	21:00	4	2.8	0.0	17	16	0.0	0.0
	22:00	5	2.8	0.0	18	16	0.0	0.0
	23:00	6	2.8	0.0	19	16	0.0	0.0
	0:00	7	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
16/07/2019	1:00	8	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	2:00	9	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	3:00	10	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	4:00	11	2.9	0.0	22	16	0.0	0.0
	5:00	12	2.9	0.0	22	16	0.0	0.0
	6:00	13	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	7:00	14	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	8:00	15	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	9:00	16	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	10:00	17	2.8	0.0	22	16	0.0	0.0
	11:00	18	2.7	0.0	22	16	0.0	0.0
	12:00	19	2.6	0.0	22	16	0.0	0.0
	13:00	20	2.4	0.0	22	16	0.0	0.0
	14:00	21	2.2	0.0	20	16	0.0	0.0
	15:00	22	2.7	0.0	20	16	0.0	0.0
	16:00	23	2.1	0.0	20	16	0.0	0.0
	17:00	24	1.4	0.0	20	16	0.0	0.0
	18:00	25	1.3	0.0	20	16	0.0	0.0
	19:00	26	1.2	0.0	20	16	0.0	0.0
	20:00	27	1.2	0.0	20	16	0.0	0.0
	21:00	28	1.1	0.0	22	16	0.0	0.0
22:00	29	1.1	0.0	22	16	0.0	0.0	
23:00	30	1.0	0.0	21	17	0.0	0.0	
0:00	31	1.0	0.0	22	17	0.0	0.0	
17/07/2019	1:00	32	1.0	0.0	22	17	0.0	0.0
	2:00	33	1.0	0.0	22	16	0.0	0.0
	3:00	34	1.0	0.0	22	16	0.0	0.0
	4:00	35	1.0	0.0	21	16	0.0	0.0
	5:00	36	1.0	0.0	21	17	0.0	0.0
	6:00	37	1.0	2.8	24	24	0.0	0.0
	7:00	38	1.4	2.7	47	44	0.0	0.0
	8:00	39	2.7	2.7	81	55	0.0	0.0

Solução Técnica Desenvolvida

	9:00	40	2.9	2.7	82	62	0.7	0.7
	10:00	41	3.8	2.7	91	65	1.0	1.7
	11:00	42	3.8	2.7	95	69	4.0	5.7
	12:00	43	3.5	2.7	98	70	2.0	7.7
	13:00	44	3.2	2.6	96	74	1.0	8.7
	14:00	45	3.1	2.6	97	75	2.0	10.7
	15:00	46	2.9	2.6	97	77	1.0	11.7
	16:00	47	2.8	2.6	97	79	1.5	13.2
	17:00	48	2.6	2.6	99	80	2.2	15.4
	18:00	49	2.5	2.7	99	83	0.8	16.2
	19:00	50	2.4	2.7	99	84	0.5	16.7
	20:00	51	2.4	2.7	100	85	1.0	17.7
	21:00	52	2.0	2.7	100	86	0.6	18.3
	22:00	53	2.0	2.7	99	87	1.5	19.8
	23:00	54	2.0	2.7	99	88	0.6	20.4
	0:00	55	1.9	2.7	101	89	0.8	21.2
18/07/2019	1:00	56	1.9	2.8	101	90	0.6	21.8
	2:00	57	1.9	2.8	101	91	0.6	22.4
	3:00	58	1.9	2.8	102	91	0.6	23.0
	4:00	59	1.9	2.8	102	92	0.5	23.5
	5:00	60	1.8	2.8	103	92	0.6	24.1
	6:00	61	1.8	2.8	104	93	0.5	24.6
	7:00	62	1.8	2.8	104	93	0.6	25.2
	8:00	63	1.8	2.8	104	93	0.6	25.8
	9:00	64	1.8	2.8	106	94	0.6	26.4
	10:00	65	1.8	2.8	108	95	0.5	26.9
	11:00	66	1.9	2.6	110	96	0.6	27.5
	12:00	67	1.9	2.6	110	97	0.7	28.2
	13:00	68	1.9	2.6	108	98	0.8	29.0
	14:00	69	1.9	2.6	109	98	0.6	29.6
	15:00	70	1.8	2.6	110	98	0.5	30.1
	16:00	71	1.8	2.6	110	98	0.8	30.9
	17:00	72	1.8	2.7	111	99	0.7	31.6
	18:00	73	1.7	2.6	110	101	0.6	32.2
	19:00	74	1.7	2.6	112	100	0.6	32.8
	20:00	75	1.6	2.8	110	101	0.8	33.6
21:00	76	1.6	2.8	110	101	0.5	34.1	
22:00	77	1.6	2.8	110	102	0.5	34.6	
23:00	78	1.5	2.8	110	102	0.6	35.2	
0:00	79	1.5	2.8	110	102	0.5	35.7	
19/07/2019	1:00	80	1.5	2.7	110	101	0.5	36.2
	2:00	81	1.5	2.7	110	102	0.5	36.7
	3:00	82	1.4	2.8	110	102	0.4	37.1
	4:00	83	1.4	2.8	110	103	0.4	37.5
	5:00	84	1.4	2.8	110	103	0.5	38.0
	6:00	85	1.4	2.8	110	103	0.5	38.5
	7:00	86	1.4	2.8	110	103	0.5	39.0
	8:00	87	1.4	2.8	110	103	0.5	39.5
	9:00	88	1.3	2.8	110	103	0.5	40.0
	10:00	89	1.3	2.8	110	103	0.4	40.4
	11:00	90	1.3	2.8	110	103	0.4	40.8
	12:00	91	1.3	2.8	110	103	0.4	41.2
	13:00	92	1.3	2.8	110	103	0.4	41.6
	14:00	93	1.3	2.6	110	103	0.4	42.0
	15:00	94	1.3	2.6	110	103	0.3	42.3

Solução Técnica Desenvolvida

	16:00	95	1.2	2.6	110	103	0.3	42.6
	17:00	96	1.2	2.6	110	103	0.2	42.8
	18:00	97	1.2	2.5	110	103	0.3	43.1
	19:00	98	1.2	2.6	110	103	0.2	43.3
	20:00	99	1.2	2.7	110	102	0.2	43.5
	21:00	100	1.2	2.3	25	96	0.2	43.7
	22:00	101	0.9	2.7	96	98	0.2	43.9
	23:00	102	1.0	2.7	103	100	0.2	44.1
	0:00	103	1.0	2.8	107	101	0.2	44.3
20/07/2019	01:00	104	1.0	2.8	109	101	0.2	44.5
	02:00	105	1.1	2.8	110	100	0.2	44.7
	03:00	106	1.1	2.8	111	101	0.2	44.9
	04:00	107	1.1	2.8	110	102	0.2	45.1
	05:00	108	1.1	2.8	110	102	0.2	45.3
	06:00	109	1.1	2.8	110	102	0.3	45.6
	07:00	110	1.1	2.8	110	102	0.2	45.8
	08:00	111	1.1	2.8	110	102	0.2	46.0
	09:00	112	1.1	2.8	110	102	0.2	46.2
	10:00	113	1.1	2.7	110	102	0.3	46.5
	11:00	114	1.1	2.8	110	102	0.3	46.8
	12:00	115	1.1	2.7	110	102	0.3	47.1
	13:00	116	1.1	2.7	110	102	0.3	47.4
	14:00	117	1.1	2.7	110	102	0.3	47.7
	15:00	118	1.1	2.7	110	102	0.3	48.0
	16:00	119	1.0	2.7	110	103	0.3	48.3
	17:00	120	1.0	2.7	110	103	0.2	48.5
18:00	121	1.0	2.8	110	103	0.3	48.8	
19:00	122	1.0	2.8	110	103	0.3	49.1	
20:00	123	1.0	2.8	110	103	0.3	49.4	
21:00	124	1.0	2.8	110	103	0.3	49.7	
22:00	125	1.0	2.7	110	103	0.3	50.0	
23:00	126	1.0	2.7	110	103	0.2	50.2	
00:00	127	1.0	2.7	110	102	0.2	50.4	
21/07/2019	01:00	128	1.0	2.7	110	103	0.2	50.6
	02:00	129	1.0	2.8	110	103	0.2	50.8
	03:00	130	1.0	2.8	110	103	0.2	51.0
	04:00	131	1.0	2.8	110	103	0.2	51.2
	05:00	132	1.0	2.8	110	103	0.2	51.4
	06:00	133	1.0	2.8	110	103	0.2	51.6
	07:00	134	1.0	2.8	110	103	0.2	51.8
	08:00	135	1.0	2.8	110	102	0.1	51.9
	09:00	136	1.0	2.7	110	102	0.1	52.0
	10:00	137	1.0	2.7	110	102	0.2	52.2
	11:00	138	0.9	2.7	110	102	0.1	52.3
	12:00	139	0.9	2.7	110	102	0.1	52.4
	13:00	140	0.9	2.7	110	102	0.1	52.5
	14:00	141	0.9	2.6	110	102	0.1	52.6
	15:00	142	0.9	2.6	110	102	0.1	52.7
	16:00	143	0.9	2.8	110	102	0.1	52.8
	17:00	144	1.0	2.8	110	102	0.1	52.9
18:00	145	0.9	2.8	110	102	0.1	53.0	
19:00	146	1.0	2.8	110	102	0.1	53.1	
20:00	147	0.9	2.7	110	103	0.1	53.2	
21:00	148	0.9	2.7	110	103	0.1	53.3	
22:00	149	0.9	2.6	110	103	0.1	53.4	

Solução Técnica Desenvolvida

	23:00	150	0.9	2.6	110	103	0.1	53.5
	00:00	151	0.9	2.6	110	103	0.1	53.6
22/07/2019	01:00	152	0.9	2.7	110	103	0.1	53.7
	02:00	153	0.9	2.7	110	102	0.1	53.8
	03:00	154	0.9	2.7	110	102	0.1	53.9
	04:00	155	0.9	2.7	110	102	0.1	54.0
	05:00	156	0.9	2.7	110	102	0.1	54.1
	06:00	157	0.9	2.7	110	102	0.1	54.2
	07:00	158	0.9	2.8	110	102	0.1	54.3
	08:00	159	0.9	2.8	110	102	0.1	54.4
	09:00	160	0.9	2.8	110	102	0.1	54.5
	10:00	161	0.9	2.8	109	102	0.1	54.6
	11:00	162	0.9	2.8	109	102	0.1	54.7
	12:00	163	0.9	2.8	110	102	0.1	54.8
	13:00	164	0.9	2.8	111	103	0.1	54.9
	14:00	165	0.9	2.8	109	103	0.1	55.0
	15:00	166	0.9	2.7	109	103	0.1	55.1
	16:00	167	0.9	2.6	110	103	0.1	55.2
	17:00	168	0.9	2.8	110	103	0.1	55.3
	18:00	169	0.9	2.8	110	103	0.1	55.4
	19:00	170	0.9	2.8	110	103	0.2	55.6
	20:00	171	0.9	2.8	110	103	0.2	55.8
	21:00	172	0.9	2.6	110	103	0.2	56.0
	22:00	173	0.9	2.6	110	103	0.2	56.2
	23:00	174	0.9	2.6	110	103	0.1	56.3
	00:00	175	0.9	2.7	110	103	0.1	56.4
23/07/2019	01:00	176	0.9	2.7	110	103	0.1	56.5
	02:00	177	0.9	2.8	110	103	0.1	56.6
	03:00	178	0.9	2.8	110	103	0.1	56.7
	04:00	179	0.9	2.7	110	103	0.1	56.8
	05:00	180	0.9	2.6	110	103	0.1	56.9
	06:00	181	0.9	2.6	110	103	0.1	57.0
	07:00	182	0.9	2.6	110	103	0.1	57.1
	08:00	183	0.9	2.6	110	102	0.1	57.2
	09:00	184	0.9	2.8	110	102	0.1	57.3
	10:00	185	0.9	2.8	110	102	0.1	57.4
	11:00	186	0.9	2.8	110	102	0.1	57.5
	12:00	187	0.9	2.8	110	102	0.1	57.6
	13:00	188	0.9	2.8	110	103	0.1	57.7
	14:00	189	0.9	2.7	110	103	0.1	57.8
	15:00	190	0.9	2.6	110	103	0.1	57.9
	16:00	191	0.8	2.6	110	103	0.1	58.0
	17:00	192	0.8	2.6	110	103	0.1	58.1
	18:00	193	0.8	2.6	110	103	0.1	58.2
	19:00	194	0.8	2.6	110	103	0.1	58.3
	20:00	195	0.8	2.6	110	103	0.1	58.4
	21:00	196	0.8	2.6	110	103	0.1	58.5
	22:00	197	0.8	2.7	110	103	0.1	58.6
	23:00	198	0.8	2.8	110	103	0.1	58.7
	00:00	199	0.8	2.8	110	103	0.1	58.8
24/07/2019	01:00	200	0.8	2.8	110	103	0.1	58.9
	02:00	201	0.8	2.7	110	103	0.1	59.0
	03:00	202	0.8	2.7	110	103	0.1	59.1
	04:00	203	0.8	2.7	110	103	0.1	59.2
	05:00	204	0.8	2.7	110	103	0.1	59.3

Solução Técnica Desenvolvida

	06:00	205	0.8	2.7	110	103	0.1	59.4
	07:00	206	0.8	2.7	110	103	0.1	59.5
	08:00	207	0.8	2.7	110	103	0.1	59.6
	09:00	208	0.8	2.6	110	103	0.1	59.7
	10:00	209	0.8	2.7	110	103	0.1	59.8
	11:00	210	0.8	2.7	110	103	0.1	59.9
	12:00	211	0.8	2.7	110	103	0.1	60.0
	13:00	212	0.8	2.7	110	103	0.1	60.1
	14:00	213	0.8	2.7	110	103	0.1	60.2
	15:00	214	0.8	2.7	110	103	0.1	60.3
	16:00	215	0.8	2.6	110	103	0.1	60.4
	17:00	216	0.8	2.5	110	103	0.1	60.5
	18:00	217	0.5	0.0	83	100	0.0	60.5
	19:00	218	0.5	0.0	72	95	0.0	60.5
	20:00	219	0.5	0.0	59	88	0.0	60.5
	21:00	220	0.5	0.0	40	80	0.0	60.5
	22:00	221	0.5	0.0	39	79	0.0	60.5
	23:00	222	0.5	0.0	38	78	0.0	60.5
	00:00	223	0.5	0.0	38	75	0	60.5
25/07/2019	01:00	224	0.5	0.0	38	73	0.0	60.5
	02:00	225	0.5	0.0	38	72	0.0	60.5
	03:00	226	0.4	0.0	37	70	0.0	60.5
	04:00	227	0.4	0.0	37	68	0.0	60.5
	05:00	228	0.4	0.0	34	67	0.0	60.5
	06:00	229	0.4	0.0	32	66	0.0	60.5
	07:00	230	0.4	0.0	29	64	0.0	60.5
	08:00	231	0.4	0.0	27	61	0.0	60.5
	09:00	232	0.4	0.0	25	58	0.0	60.5

O que irá dar lugar aos seguintes gráficos:



Figura 5.29 - Gráfico da evolução do vácuo na cuba do transformador

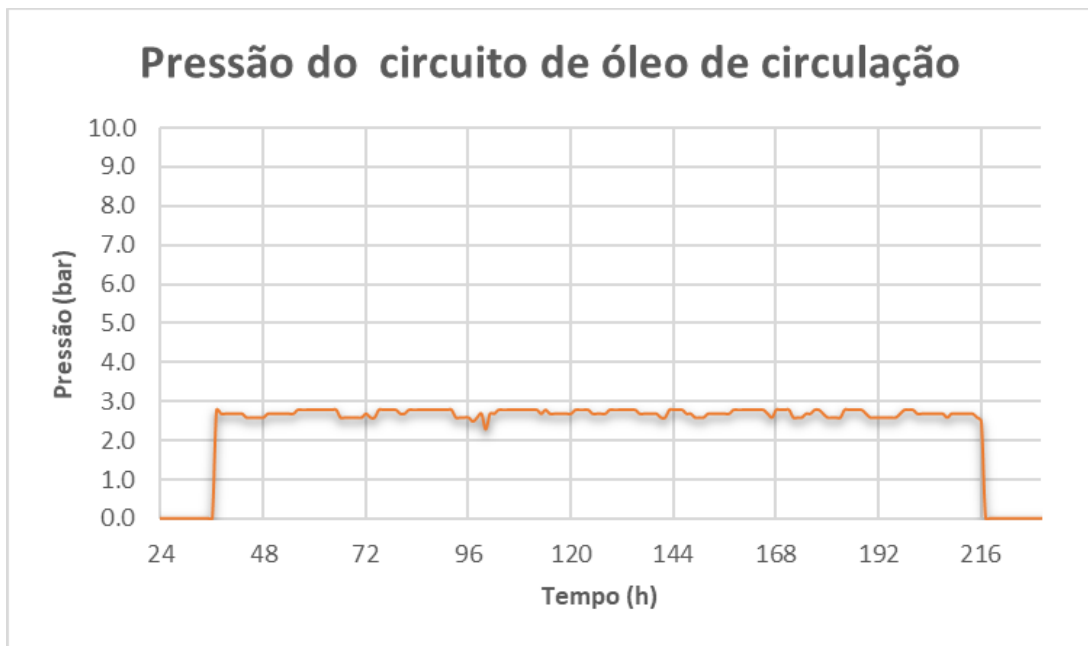


Figura 5.30 - Gráfico da monitorização da pressão do circuito de óleo

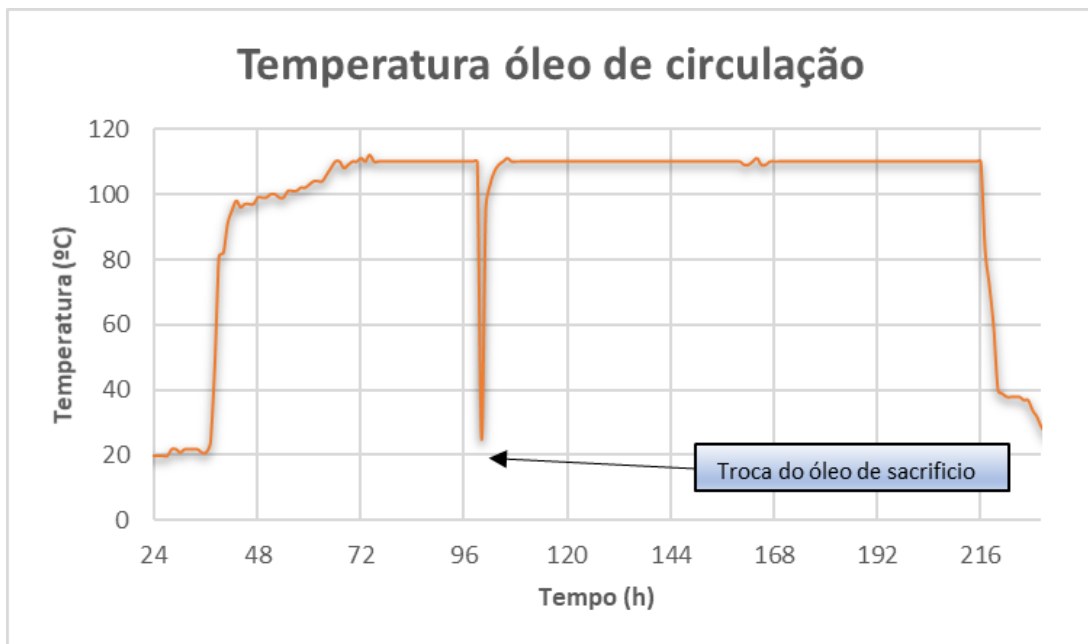


Figura 5.31 - Gráfico da monitorização da temperatura do óleo de circulação

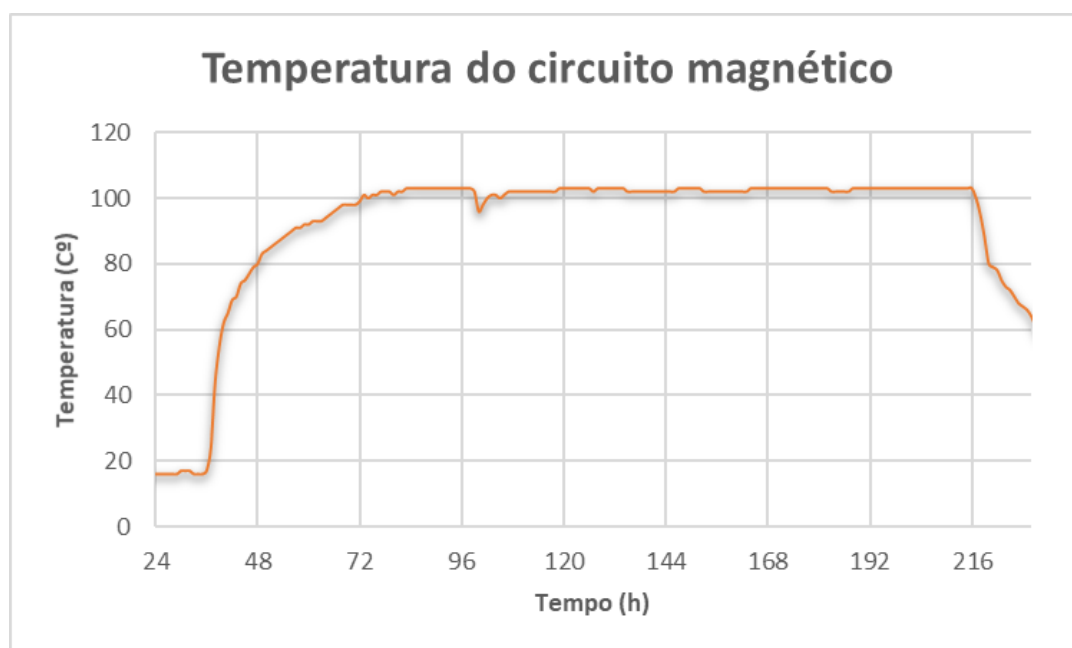


Figura 5.32 - Gráfico da monitorização da temperatura do circuito magnético

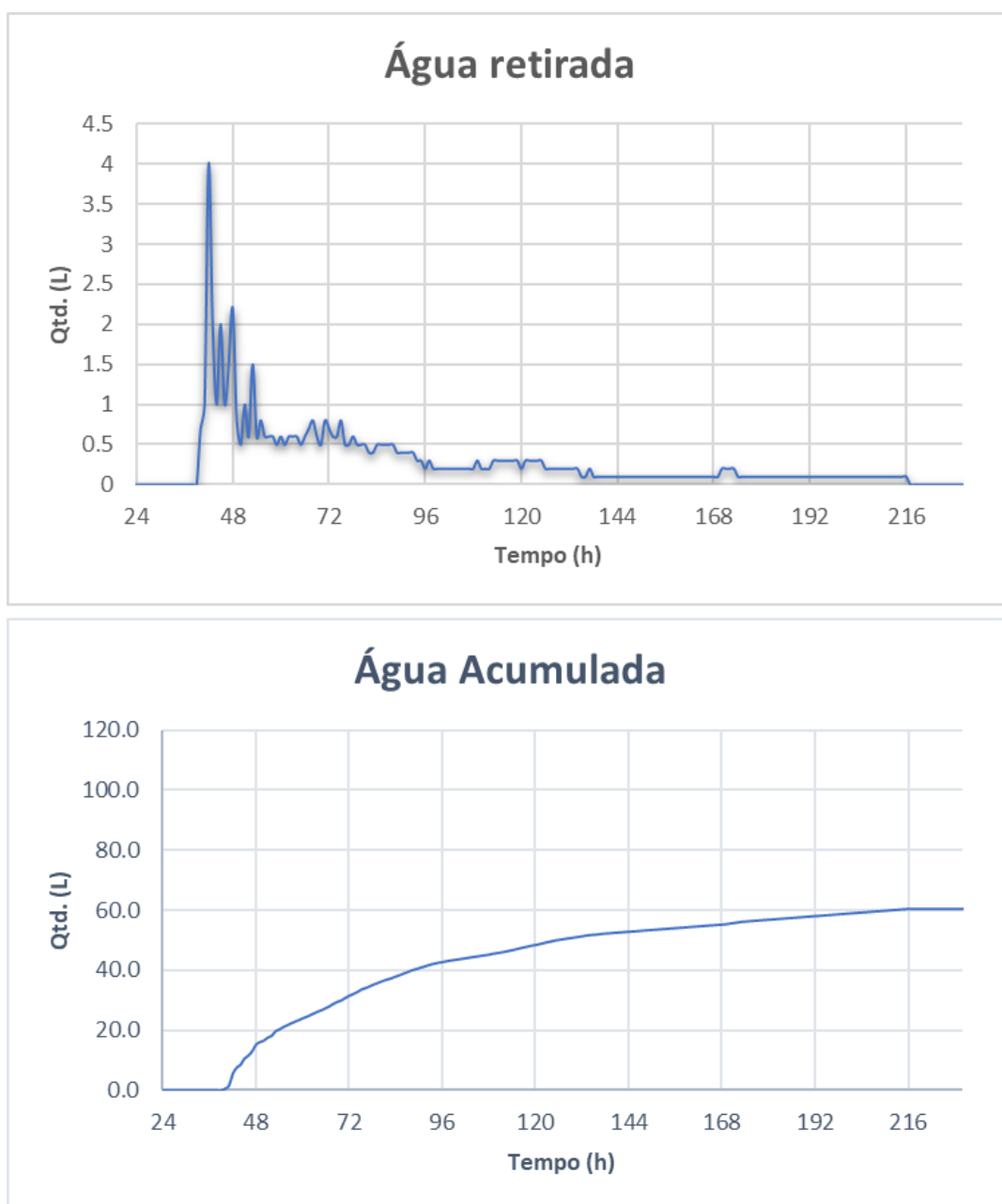


Figura 5.33 - Gráficos da quantificação de água extraída

5.6. Custos da solução

Não é do âmbito do presente trabalho apresentar uma elaborada análise económica á solução que foi desenvolvida, contudo, não seria um trabalho completo se não fosse feita uma pequena exposição dos valores envolvidos na montagem do sistema, no custo da sua implementação numa máquina de secagem e o benefício valor homem/hora que é poupado sem necessidade de ser feito o registo de variáveis por um operador.

5.6.1. Custo dos componentes

Na tabela 5.9, são apresentados os valores de todos os componentes usados para criar o protótipo usado nesta dissertação.

Tabela 5.9 - Preço dos componentes do sistema

Módulo Arduino Uno Rev3	23.95€
Nextion NX4827T043 4.3''	32.26€
Fonte alimentação DC5V 6A (30W)	8.06€
Sensor MAX6675 para termopar	3.35€
RTD PT100 (x2)	19.60€
MAX31865 para PT100 (x2)	10.16€
Sensor de pressão WIKA S-10	105.16€
Módulo medição corrente loop 4-20mA	12€
Sensor ultrassónico Pepperl + Fuchs UC2000-30GM-E6R2-V15	195€
Sensor de vácuo Inficon PSG500	525€
Leybold Display One	680€
Módulo cartão SD	3.5€
Módulo de prototipagem para Arduino Uno	5.50€

O valor total do sistema chave na mão chega á soma de 1623.54€, contudo, e de forma a sermos mais corretos, não foi necessário investir no sensor de vácuo nem no leitor da Leybold. Isto porque são equipamentos já existentes sempre no aquecedor usado para o processo de secagem, por isso, o valor real fica nos 418.54€.

Solução Técnica Desenvolvida

A instalação pode ser feita diretamente no armário da máquina de secagem sem recorrer a uma caixa externa, e a instalação dos sensores a adaptar no circuito de óleo requer somente a simples soldadura de 3 casquilhos $\frac{1}{2}$ '' para instalação das PT100 e do sensor de pressão.

Os restantes sensores não requerem intervenção na máquina existente.

5.6.2. Benefício económico

Uma secagem é realizada sem interrupções, 24h em dias consecutivos.

No caso prático exposto nesta dissertação, a secagem durou 232h, das quais 133h são consideradas extras.

Como o presente trabalho foi pensado para ser realizado em ambiente fabril, não vamos contabilizar as 8 horas normais de trabalho.

Tendo em conta que o custo homem/hora é de cerca 30€/h (240€/dia), apenas nas horas diurnas e que as noturnas têm um acréscimo de 50%, significa que ao dia teremos, $(45 \cdot 16) = 720\text{€}$.

Ora, isto seria se efetivamente o operador estivesse inteiramente dedicado a esta tarefa, o que em ambiente noturno não acontece, e as anotações das variáveis são somente realizadas a cada 2 horas por um colaborador de outra secção, por isso no limiar, se quisermos ser minuciosos e criteriosos, vamos considerar 15mn por cada anotação (tempo do colaborador se deslocar da sua área e interromper as suas tarefas).

Isto é $\frac{1}{4}$ de 45€, logo teremos 11.25€/cada duas horas, ou seja, 78.75€/dia de secagem.

O que significa em contas simples, que a duração de 9 dias do caso prático apresentados nesta dissertação equivale a $9 \cdot 78.75\text{€}$, o que perfaz um total de aproximadamente 708€.

O retorno do investimento num equipamento destes seria efetivamente ganho logo numa primeira secagem, ficando o benefício do equipamento instalado para todas as aplicações futuras.

5.7. Análise e interpretação de resultados

No final desta experiência, e com a implementação do sistema desenvolvido num contexto de secagem por HOS em fábrica, podemos retirar as seguintes informações:

- Esta secagem pelo método HOS permitiu retirar um total de **60,5** litros de água dos isolantes sólidos do transformador;
- Todo o processo fez um total de **232** horas;
- A temperatura máxima atingida pelo circuito magnético foi de **103°C**;
- A temperatura máxima que o óleo de circulação atingiu foi de **113°C**;
- O vazio fino, no final da secagem estabilizou nos **0,4mbar**;

Os dados verificados nos gráficos apontam para uma secagem bem realizada, com evolução gradual das grandezas, nomeadamente no estabilizar da temperatura do circuito magnético em torno dos 100°C, o que é pretendido em qualquer secagem.

Conforme descrito no estado de arte da presente dissertação, os valores mais importantes para uma correta avaliação da condição de secagem são a temperatura e a evolução do vácuo. Na parte inicial de uma secagem, o valor do vácuo desce sempre até a temperatura interna do transformador começar a subir e neste caso o valor do vácuo atingiu o seu valor máximo de 3,8mbar às 42h. Altura em que a temperatura do circuito magnético do transformador já se encontrava a 69°C.

Neste caso, isto implica que a temperatura dos isolantes sólidos já se encontrava acima dos 60°C, altura em que a água começa a migrar para a atmosfera externa e quando é recuperada pelo vácuo. Por isso mesmo, neste intervalo de hora foram recuperados 4litros de água, o pico.

A partir deste valor e sempre a subir a temperatura até aos 100°C, onde a temperatura interna do transformador estabiliza, a água foi sendo removida e o vácuo foi diminuindo, ou seja, no que realmente comprova o bom funcionamento da secagem. Isto é, o vácuo terá de rondar no final da secagem pós-retirada do óleo de sacrifício, um valor igual ou inferior a 1mbar.

Solução Técnica Desenvolvida

A paragem do processo foi definida pelo estabilizar desta temperatura e a gradual diminuição da saída de água a cada hora, o que significa que a partir do momento em que não saiu mais água (saída constante em torno dos 100ml), e o valor do vácuo estabilizou abaixo de 1mbar, foi a altura para parar o spray e iniciar o vácuo fino.

A paragem do spray foi feita às 217 horas e a paragem total do processo foi realizada quando a temperatura do circuito magnético atingiu os 58°C (valor abaixo dos 60°C, mínimo permitido para a abertura do transformador pós-secagem).

6. Conclusão

6.1. Análises conclusivas

O trabalho proposto pretendia desenvolver uma solução que automatizasse de certa forma o processo de secagem pelo método HOS. E de forma muito específica, que monitorizasse as grandezas mais importantes envolvidas e sua evolução.

Ao desenvolver esta solução, alguns aspetos importantes foram atingidos:

- Libertação de um operador que constantemente teria de realizar uma simples tarefa de registo de dados a cada hora;
- Diminuição dos erros de registo, dado que o fator humano foi retirado da tarefa de data logging e passou a ser automatizado;
- Visualização em tempo real e concentrada num só ponto, de todas as variáveis envolvidas;
- Facilidade de implementação dos valores numa simples folha de cálculo pré-formatada e como tal aumento de eficácia na elaboração de relatórios para o cliente;
- Custo reduzido de implementação com tempo de retorno desprezável dentro do custo que engloba uma secagem a um transformador de potência.
- Dentro dos objetivos que tinham sido definidos para o sucesso da presente dissertação, pode-se dizer que os mesmos foram atingidos e os resultados e comportamento do sistema apresentaram sucesso.

O próprio sistema foi feito a pensar na simplicidade de operação e implementação, para que qualquer pessoa o possa usar e aplicar com relativa facilidade numa máquina de aquecimento existente.

Por fim, com este trabalho, conseguiram-se também, de um ponto de vista académico, dar uso a diversos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de sistemas elétricos de energia, e do uso de um microcontrolador para registo de dados decorrentes de processos industriais, na forma materializada de uma placa de desenvolvimento genérica.

6.2. Trabalhos futuros e melhorias

A solução desenvolvida, tal como qualquer sistema baseado num microcontrolador e software, tem sempre a possibilidade de sofrer alterações e melhorias.

O objetivo do trabalho nunca foi realizar um sistema fechado e por isso mesmo se optou por uma solução de hardware acessível ao público em geral e com código fonte editável e configurável.

Agora que o sistema foi validado com uma placa de desenvolvimento simples, o primeiro passo de melhoria seria alterar o microcontrolador para uma solução mais adaptada á industria, ou seja, o Arduino Uno utilizado serviu para a prototipagem da solução, contudo não é o tipo de placa que esteja preparada para uso industrial, que está permanentemente sujeita a possíveis perturbações de rede e/ou interferências circundantes devido aos diferentes circuitos de potência e eletrónica que existem numa fábrica.

Desta forma propunha-se a alteração do Arduino para a versão Industrial 101, já com um Atmega32u4 e wi-fi integrado ou então melhor ainda a versão Industruino²⁵, já comercializado por pouco mais de uma centena de euros.

O outro passo interessante de desenvolver era adicionar uma placa wi-fi ao projeto existente, ou usar uma das soluções indicadas no parágrafo anterior, para criar um web server com acesso remoto, em que os dados de leitura eram automaticamente enviados para uma página e com visualização real.

Dentro do âmbito do controlo da máquina, poder-se-ão também, futuramente, utilizar as entradas digitais ainda disponíveis, para integrar um sistema redundante de proteções da máquina de secagem, com criação de relatórios de erros e alarmes.

Por último, para máquinas de secagem móveis, usadas para secagem em subestações, logo fora das instalações da fábrica, poder-se-ia adicionar um módulo GSM para aceder aos valores em qualquer lugar.

²⁵ Industruino é uma placa compatível com Arduino, fechada dentro de uma caixa do tipo DIN-rail para montagem em quadros elétricos. Possui já o seu próprio LCD e tem um ADC interno de 18bits capaz de ler altas resoluções de sensores.

Referências Bibliográficas

- [1] CARVALHO C., 1983, “*TRANSFORMADORES*”, 2ª ED., EDITORIAL ENGENHARIA
- [2] DOHNAL, DIETER, 2012, “*On load tap changers for power transformers: A technical digest*”, MR Publication, Germany
- [3] DUPONT, Annual Report,2017
- [4] DUPONT, Annual Report,2018
- [5] EFACEC ENERGIA
- [6] EN 13306: 2001 08 01 “Maintenance Terminology
- [7] EVANS, BRIAN W., 2007, “*Arduino programming notebook*”, 1st Ed., Creative Commons, San Francisco, USA MAURO, Douglas; SCHMIDT, Kevin—*Essential SNMP, Help for System and Network Administrators*. O’Reilly, 2001. ISBN 0-596-00020-0.
- [8] FONSECA, J.F., 2014, “*Elementos de manutenção em transformadores de potência*”, Trabalho de graduação em engenharia elétrica – Universidade Estadual Paulista, Brasil PINTO, J. A. Cardoso—*RETA, Manual de Referência*. PT- Comunicações, 2004.
- [9] FUJIMOTO N., RIZZETTO S., BRAUN J.M., “*Partial discharge – Improved PD testing of solid dielectrics using x-ray induced discharge initiation*”, 1992
- [10] GERTZ, EMILY / JUSTO DI PATRICK, 2012, “*Atmospheric monitoring with arduino*”, O’Rilley Media Inc., US ROSE, Marshall T. —*The Simple Book: An Introduction to Networking Management, Readings in Simple Network Management Protocol*. Prentice Hall, Inc, 1996. ISBN 0-13-451659-1.
- [11] HARLOW, JAMES H., 2004, “*Electric power transformer engineering*”, 1st. Ed., CRC Press LLC; US
- [12] HEATHCOTE, MARTIN J., 1998, “*The J & P transformer book*”, 12ª Ed., Newnes, UK
- [13] IEC 60296
- [14] IEEE Std 1064-1991, “*IEEE Guide for Multifactor Stress Functional Testing of Electrical Insulation Systems*”, 1991
- [15] J. FABRE / A. PICHON, “*Deteriorating processes and product of paper in oil. Application to transformers*”, CIGRE, Paris, France, 1960, Paper 137

- [16] KHAPARDE, S.A./ KULKARNI, S.V., 2004, “*Transformer engineering – Design and practice*”; Marcel Dekker, Inc, New York, US
- [17] KREUGER F. H., “*Partial discharge detection in high-voltage equipment*”, 1989
- [18] MATIAS J., “*Tecnologias da Eletricidade*”, 1997
- [19] MONK, SIMON, 2012, “*Programming arduino*”, McGraw-Hill e-book,
- [20] MUNTEANU, ADRIAN / IULIAN, LUCIAN; 2009, “*Determination of the Power Transformer Efficiency Monitoring the Electrical Insulation Parameters*”, Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures Vol. 6 (XXIII)
- [21] NYNAS, Annual Report,2018
- [22] PARRISH R.H., KELLY J.J., MYERS S.D., “*Electric Transformers Maintenance Repair*”,1981
- [23] R.J. HEYWOOD, A.M. EMSLEY, M. ALI “*Degradation of cellulosic insulation in power transformers*”, IEE Proc.- Sci. Meas. Technol. Vol. 147 No. 2, March 2000
- [24] RAO M. R., SINGH B. P.,2001, “*Detection and Localization of Interterm Fault in the HV Winding of a Power Transformer Using Wavelets*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation, Vol. 8 No. 4
- [25] SAVIO, LEO J., and T. HAUPERT. 2004. “*Insulating media in electric power transformer engineering*”, ed. J. H. Harlow,
- [26] SCHMIDT MAIK, 2011, “*Arduino – a quick-start guide*”, The pragmatic Bookshelf, Dallas, US
- [27] STREETER L., WYLIE B., “*Mecânica dos Fluidos*”, 1982
- [28] STEEVES, GREGORY R., “*Vapor phase transformer drying – part I*”, Transformers magazine, Vol. 3, issue 2, www.transformers-magazine.com
- [29] SUN, JIANTAO / LI, XINING / ZHU, LINGYU / JI, SHENGCHANG / CUI, YANJIE, 2017, “*Partial discharge of needle-plane defect in oil-paper insulation under AC and DC combined voltages: Developing processes and characteristics*”, Energies Article, SW
- [30] TANG, W.H. / WU, Q.H., “*Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence*”, Springer, 2011, New York, US
- [31] TEIXEIRA, T, 2008, “*Maintenance*”, EFACEC Operational Instruction No 11-05-014-00, Service department

- [32] TEIXEIRA, T., 2008, “*Product generalities*”, EFACEC Operational Instruction No 11-05-010-00, Service department
- [33] TEIXEIRA, T., 2012, “*Operating instructions*”, EFACEC Operational Instruction No 11-05-013-00, Service department
- [34] WILLIAMS, ARTHUR, 2011, “*Fundamentals of magnetics design: Inductors and transformers*”, IEEE publication
- [35] ZAHN M., DU Y., LESIEUTRE B.C., MAMISHEV A.V., Lindgren S.R., Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems, 1999

www.arduino.cc

(Acedido pela última vez a 12 de Agosto de 2019)

<https://nextion.tech/>

(Acedido pela última vez a 27 de Agosto de 2019)

Anexos

Código completo desenvolvido retirado do IDE

```
/*
  AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DA PARTE ACTIVA DE TRANSFORMADORES DE
  POTÊNCIA PELO MÉTODO HOS - HOT OIL SPRAY
  PROGRAMA DE DATALOGING E CONTROLO

  MOISÉS SILVA
  ISEP 2019
*/

//***TERMOPAR TEMPERATURA DO CM***
// CARREGAMENTO DA BIBLIOTECA DO CAPTADOR MAX6675
// DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include "max6675.h"

int ktcSO = 12;
int ktcCS = 8;
int ktcCLK = 13;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);

//***PT100 ÓLEO DE CIRCULAÇÃO E TERMOFLUIDO***
// ESTE SENSOR USA SPI PARA COMUNICAR, SÃO NECESSÁRIOS 4 PINOS PARA LIGAÇÃO
// CARREGAMENTO DA BIBLIOTECA DO CAPTADOR MAX31865
// DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 max_1 = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
Adafruit_MAX31865 max_2 = Adafruit_MAX31865(9, 11, 12, 13);
// use hardware SPI, just pass in the CS pin
//Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(10);

// VALOR PARA RESISTÊNCIA DE REFERÊNCIA (Rref). USAR 430.0 OHMS PARA PT100
#define RREF 430.0 // Variável Ajustável Em Função Da Resistência
(CALIBRADO COM FLUKE 179)
// VALOR "NOMINAL" 0 GRAUS °C DO SENSOR
// 100.0 PARA PT100
#define RNOMINAL 100.0

//Carregamento da biblioteca do SD card e definição do pino 7 como Chip select

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 7;

// Rotina de inicializações do ARDUINO:

void setup() {

  // Abertura da porta de serie com uma taxa de envio de 9.6Kbps:

  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
  }
  // Configuração das sondas PT100:

  max_1.begin(MAX31865_3WIRE); // Configuração das sondas pt100 (3 fios)
  max_2.begin(MAX31865_3WIRE); // Configuração das sondas pt100 (3 fios)
}
```

```

// Verificação Da Inserção do cartão SD:

if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("cartão danificado, ou não presente");
  // Não executa mais nenhuma acção
  while (1);
}
Serial.println("Cartão Disponível.");

// Rotina Ciclica do ARDUINO:

void loop() {

  // Aquisição de dados do Arduino

  // Leitura Resistencias / Conversão para Hmi Nextion

  // Temperatura oleo termofluido:

  String temperatura_termofluido_hmi; //Variavel Para Hmi Nextion

  temperatura_termofluido_hmi = (max_1.temperature(RNOMINAL, RREF));

  // Temperatura oleo circulação:

  String temperatura_oleo_circulacao_hmi; //Variavel Para Hmi Nextion

  temperatura_oleo_circulacao_hmi = (max_2.temperature(RNOMINAL, RREF));

  // Temperatura Circuito Magnetico:

  String temperatura_circuito_magnetico_hmi; //Variavel Para Hmi Nextion

  temperatura_circuito_magnetico_hmi = (ktc.readCelsius() - 2);

  // Leitura das variaveis das entradas analógicas / Conversão para Hmi Nextion:

  // Leitura do vazio na cuba do transformador (entrada analógica A0 do arduino):

  String vazio_hmi; //Variavel Para Hmi Nextion

  int vazio = analogRead(A0);

  // Converte a leitura analógica que vai de 0 a 1023 a tensão (0 - 5V):

  float tensao_3 = vazio * (5.0 / 1023);
  // Escala de 0 a 5v, cada Volt corresponde a 0.2mbar, em caso de necessidade de
  uma escala Superior necessário aumentar a resolução para 0-10V.
  // Multiplicação por 1000 para efeitos de visualização na Hmi Nextion

  //Escala Actual:

  if (tensao_3 == 0.0) {
    vazio_hmi = 0 * (1000);
  }
  if (tensao_3 == 1.0) {
    vazio_hmi = 2 * (1000);
  }
  if (tensao_3 == 2.0) {
    vazio_hmi = 4 * (1000);
  }
}

```

```

}
if (tensao_3 == 3.0) {
    vazio_hmi = 6 * (1000);
}
if (tensao_3 == 4.0) {
    vazio_hmi = 8 * (1000);
}
if (tensao_3 == 5.0) {
    vazio_hmi = 1 * (1000);
}

//Leitura da pressão do óleo de circulação (entrada analógica A1 do arduino):
String pressao_oleo_hmi; // Variavel para HMI Nextion
int pressao_oleo = analogRead(A1);

// Converte a leitura analógica que vai de 0 a 1023 a tensão (0 - 5V):
float tensao_2 = pressao_oleo * (5.0 / 1023.0);

// Variavel Para HMI Nextion
pressao_oleo_hmi = tensao_2 / 10;

// Leitura da quantidade de água retirada (entrada analógica A2 do arduino):
String agua_hmi; // Variavel para HMI Nextion
float quant_agua = analogRead(A2);

// Converte a leitura analógica que vai de 0 a 1023 a tensão (0 - 5V):
float tensao_1 = quant_agua ;
// Variavel Para HMI Nextion

//Escala Actual:
if (tensao_1 >= 250); {
    agua_hmi = 0.0;
}

if ((tensao_1 <= 249.0 and tensao_1 >= 245.0)) { // Adptação do código para
demonstração do retirar de água para o vasilhame (apresentação da tese)
    agua_hmi = 0.1;
}

if ((tensao_1 <= 244.0 and tensao_1 >= 239.0 )) {
    agua_hmi = 0.2;
}

if ((tensao_1 <= 238.0 and tensao_1 >= 232.0)) {
    agua_hmi = 0.3;
}

if ((tensao_1 <= 231.0 and tensao_1 >= 226.0)) {
    agua_hmi = 0.4;
}

if ((tensao_1 <= 225.0 and tensao_1 >= 220.0)) {
    agua_hmi = 0.5;
}

if ((tensao_1 <= 219.0 and tensao_1 >= 213.0)) {
    agua_hmi = 0.6;
}
}

```

```

if ((tensao_1 <= 212.0 and tensao_1 >= 207.0)) {
    agua_hmi = 0.7;
}

if ((tensao_1 <= 206.0 and tensao_1 >= 201.0)) {
    agua_hmi = 0.8;
}

if ((tensao_1 <= 200.0 and tensao_1 >= 195.0)) {
    agua_hmi = 0.9;
}

if ((tensao_1 <= 194.0 and tensao_1 >= 189.0)) {
    agua_hmi = 1;
}
if ((tensao_1 <= 188.0 and tensao_1 >= 183.0)) {
    agua_hmi = 1.1;
}

if ((tensao_1 <= 182.0 and tensao_1 >= 178.0)) {
    agua_hmi = 1.2;
}

if ((tensao_1 <= 177.0 and tensao_1 >= 172.0)) {
    agua_hmi = 1.3;
}

if ((tensao_1 <= 171.0 and tensao_1 >= 167.0)) {
    agua_hmi = 1.4;
}

if ((tensao_1 <= 166.0 and tensao_1 >= 165.0)) {
    agua_hmi = 1.5;
}

if (tensao_1 < 164) { //Gera um erro para falha de medição (fora do alcance)

    agua_hmi = "E1";
}

// Envio de variaveis para a Hmi Nextion

Serial.print("t12.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(temperatura_termofluido_hmi); // A String que dá o valor ao
objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);
Serial.write(0xff);

Serial.print("t13.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(temperatura_oleo_circulacao_hmi); // A String que dá o valor ao
objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);

```

```

Serial.write(0xff);

Serial.print("t14.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(temperatura_circuito_magnetico_hmi); // A String que dá o valor ao
objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);
Serial.write(0xff);

Serial.print("t15.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(pressao_oleo_hmi); // A String que dá o valor ao objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);
Serial.write(0xff);

Serial.print("t16.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(agua_hmi); // A String que dá o valor ao objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);
Serial.write(0xff);

Serial.print("t17.txt="); // Envio da valor da variavel para o objecto
correspondente na consola EX: "x0".
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (abertura)
Serial.print(vazio_hmi); // A String que dá o valor ao objecto..
Serial.print("\n"); // Como estamos a enviar em formato string tem que ter estes
caracteres especiais para o display perceber que é uma string (fecho).
Serial.write(0xff); // Limpeza do comando anterior, tem que ser dado a cada
comando.
Serial.write(0xff);
Serial.write(0xff);

//SD Card recolha de dados

int numero_ciclos = 0; // variavel para verificação dos ciclos já feitos pelo
arduino
numero_ciclos++; // incremento de 1 por cada ciclo de 50ms do arduino
bool recolhe_dados;

// Comparação para verificar em que ciclo do arduino estamos e respectivo reset
das variaveis

if (numero_ciclos == 6000) {
    numero_ciclos = 0;
    recolhe_dados = true;
}

```

```

if (numero_ciclos < 6000) {
    recolhe_dados = false;
}

if (recolhe_dados) {

    // String para recolher informações das variáveis:
    String string_de_dados = "";
    //Envio as variáveis para a string de dados

    string_de_dados = agua_hmi;
    string_de_dados = pressao_oleo_hmi;
    string_de_dados = vazio_hmi;
    string_de_dados = pressao_oleo_hmi;
    string_de_dados = temperatura_oleo_circulacao_hmi;
    string_de_dados = temperatura_circuito_magnetico_hmi;
    string_de_dados = temperatura_termofluido_hmi;

    // Abertura do ficheiro para escrever os dados

    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

    // Se SD card disponível recolhe as variáveis
    if (dataFile) {
        dataFile.println(string_de_dados);
        dataFile.close();
        //Impressão na porta de serie:
        Serial.println(string_de_dados);
    }
    // Erro se não existir dados para imprimir ou erro no ficheiro de dados:
    else {
        Serial.println("erro no ficheiro datalog.txt");
    }
}
delay (50);
}

// End of loop

```

MAXIM**Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)****General Description**

The MAX6675 performs cold-junction compensation and digitizes the signal from a type-K thermocouple. The data is output in a 12-bit resolution, SPI™-compatible, read-only format.

This converter resolves temperatures to 0.25°C, allows readings as high as +1024°C, and exhibits thermocouple accuracy of 8LSBs for temperatures ranging from 0°C to +700°C.

The MAX6675 is available in a small, 8-pin SO package.

Features

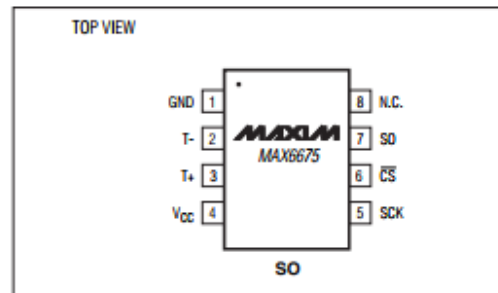
- ◆ Direct Digital Conversion of Type -K Thermocouple Output
- ◆ Cold-Junction Compensation
- ◆ Simple SPI-Compatible Serial Interface
- ◆ 12-Bit, 0.25°C Resolution
- ◆ Open Thermocouple Detection

MAX6675**Ordering Information**

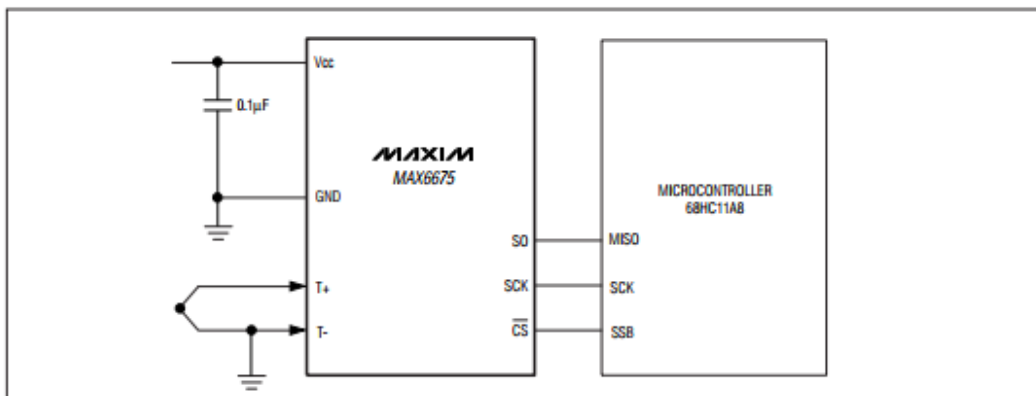
PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX6675ISA	-20°C to +85°C	8 SO

Applications

Industrial
Appliances
HVAC
Automotive

Pin Configuration

SPI is a trademark of Motorola, Inc.

Typical Application Circuit**MAXIM**

Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C)

MAX6675

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage (VCC to GND)	-0.3V to +6V	Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
SO, SCK, CS, T-, T+ to GND	-0.3V to VCC + 0.3V	Junction Temperature	+150°C
SO Current	50mA	SO Package	
ESD Protection (Human Body Model)	±2000V	Vapor Phase (60s)	+215°C
Continuous Power Dissipation (TA = +70°C)		Infrared (15s)	+220°C
8-Pin SO (derate 5.88mW/°C above +70°C)	471mW	Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C
Operating Temperature Range	-20°C to +85°C		

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(VCC = +3.0V to +5.5V, TA = -20°C to +85°C, unless otherwise noted. Typical values specified at +25°C.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Temperature Error		THERMOCOUPLE = +700°C, TA = +25°C (Note 2)	VCC = +3.3V	-5		+5	LSB
			VCC = +5V	-6		+6	
		THERMOCOUPLE = 0°C to +700°C, TA = +25°C (Note 2)	VCC = +3.3V	-8		+8	
			VCC = +5V	-9		+9	
		THERMOCOUPLE = +700°C to +1000°C, TA = +25°C (Note 2)	VCC = +3.3V	-17		+17	
			VCC = +5V	-19		+19	
Thermocouple Conversion Constant				10.25		μV/LSB	
Cold-Junction Compensation Error		TA = -20°C to +85°C (Note 2)	VCC = +3.3V	-3.0		+3.0	°C
			VCC = +5V	-3.0		+3.0	
Resolution				0.25		°C	
Thermocouple Input Impedance				60		kΩ	
Supply Voltage	VCC		3.0		5.5	V	
Supply Current	ICC			0.7	1.5	mA	
Power-On Reset Threshold		VCC rising	1	2	2.5	V	
Power-On Reset Hysteresis				50		mV	
Conversion Time		(Note 2)		0.17	0.22	s	
SERIAL INTERFACE							
Input Low Voltage	VIL				0.3 x VCC	V	
Input High Voltage	VIH		0.7 x VCC			V	
Input Leakage Current	I _{LEAK}	VIN = GND or VCC			±5	μA	
Input Capacitance	CIN			5		pF	

High-quality pressure transmitter

For general industrial applications

Model S-10

WIKA data sheet PE 81.01



for further approvals
see page 6

Applications

- Machine building
- Hydraulics and pneumatics
- Pumps
- Chemical industry

Special features

- Measuring ranges from 0 ... 0.1 to 0 ... 1,000 bar [0 ... 5 psi to 0 ... 15,000 psi]
- Non-linearity 0.2 % of span (BFSL)
- Output signals: 4 ... 20 mA, DC 0 ... 10 V, DC 0 ... 5 V and others
- Electrical connections: Angular connector form A, circular connector M12 x 1, various cable outlets and others

Description

The model S-10 pressure transmitter for general industrial applications is the ideal solution for customers with demanding measuring requirements. It features a very good accuracy, a robust design and an exceptional number of variants, meaning it can be suited to the widest range of applications.

Versatile

The model S-10 offers continuous measuring ranges between 0 ... 0.1 and 0 ... 1,000 bar [0 ... 5 psi and 0 ... 15,000 psi] in all the major units.

These measuring ranges can be combined in almost any way with all the standard industry output signals, the most common international process connections and a wide number of electrical connections.

Furthermore, it offers numerous options, such as different accuracy classes, extended temperature ranges and customer-specific pin assignments.



Pressure transmitter model S-10

High quality

The robust design turns the model S-10 into a very high quality product, which even the most adverse environmental conditions cannot affect. Whether with the lowest temperatures when used outdoors, with extreme shock and vibration in machine building or with aggressive media in the chemical industry, this transmitter can meet all requirements.

Availability

All variants described in this data sheet are available on very short lead times. For particularly urgent demands, there is a sizeable stock available.

WIKA data sheet PE 81.01 · 09/2018

Page 1 of 9

Data sheets showing similar products:
Pressure transmitter for general industrial applications; model A-10; see data sheet PE 81.60
Superior pressure transmitter for general industrial applications; model S-20; see data sheet PE 81.61
Flush pressure transmitter for viscous and particle-laden media; model S-11; see data sheet PE 81.02

WIKA

Part of your business

General Description

The MAX31865 is an easy-to-use resistance-to-digital converter optimized for platinum resistance temperature detectors (RTDs). An external resistor sets the sensitivity for the RTD being used and a precision delta-sigma ADC converts the ratio of the RTD resistance to the reference resistance into digital form. The MAX31865's inputs are protected against overvoltage faults as large as $\pm 45V$. Programmable detection of RTD and cable open and short conditions is included.

Applications

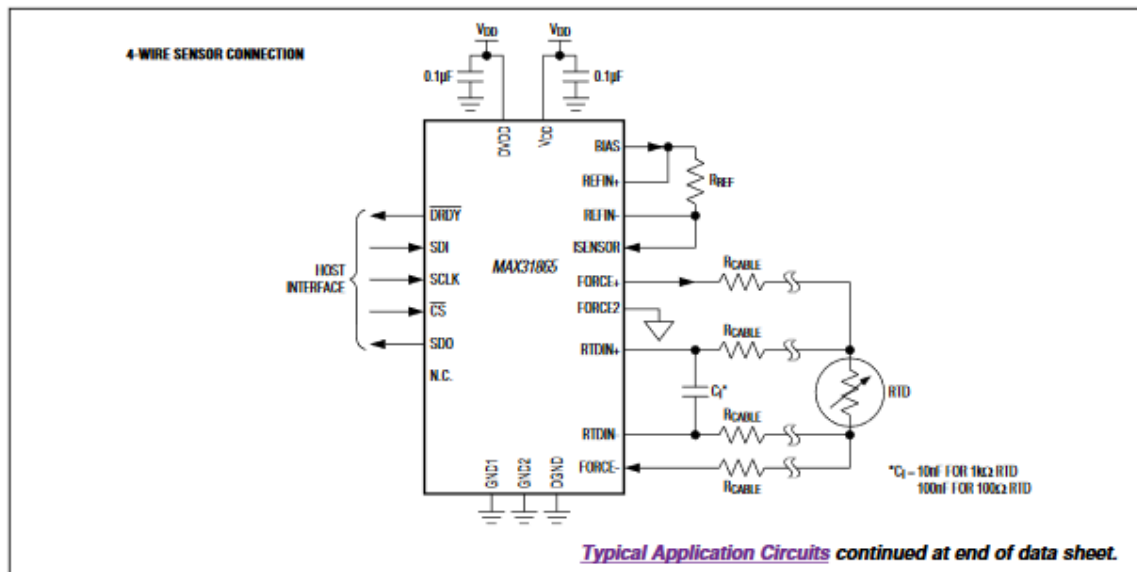
- Industrial Equipment
- Medical Equipment
- Instrumentation

Benefits and Features

- Integration Lowers System Cost, Simplifies Design Efforts, and Reduces Design Cycle Time
 - Simple Conversion of Platinum RTD Resistance to Digital Value
 - Handles 100Ω to $1k\Omega$ (at $0^\circ C$) Platinum RTDs (PT100 to PT1000)
 - Compatible with 2-, 3-, and 4-Wire Sensor Connections
 - SPI-Compatible Interface
 - 20-Pin TQFN and SSOP Packages
- High Accuracy Facilitates Meeting Error Budgets
 - 15-Bit ADC Resolution; Nominal Temperature Resolution $0.03125^\circ C$ (Varies Due to RTD Nonlinearity)
 - Total Accuracy Over All Operating Conditions: $0.5^\circ C$ (0.05% of Full Scale) max
 - Fully Differential V_{REF} Inputs
 - 21ms (max) Conversion Time
- Integrated Fault Detection Increases System Reliability
 - $\pm 45V$ Input Protection
 - Fault Detection (Open RTD Element, RTD Shorted to Out-of-Range Voltage, or Short Across RTD Element)

Ordering Information appears at end of data sheet.

Typical Application Circuits



Operating Units for Active Sensors

DISPLAY ONE



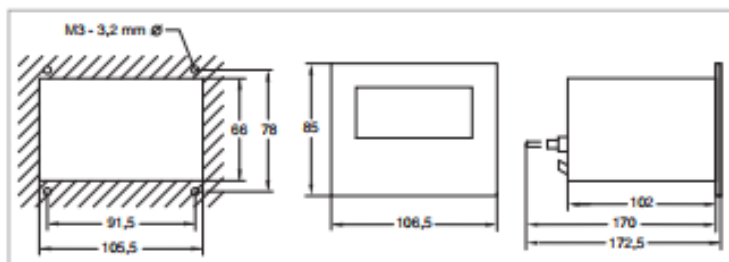
Cost-effective, compact single channel display unit for the transmitters from the THERMOVAC series and for PTR 90.

Advantages to the User

- Power supply voltage for the transmitters
- Four digit mantissa in the range from 5×10^{-9} to 2000 mbar
- Readout selectable between mbar, Torr or Pascal
- 0 to 10 V chart recorder output via plug-in screw terminals
- The switching threshold of the transmitters has been looped through to plug-in terminals
- Transmitter threshold settings can be displayed by a single key press on the transmitter
- Compact bench top enclosure (1/4 19 in., 2 HU)
- For fitting into 19 in., 3 HU racks
- Supply voltage 100 - 240 V

Connectable Sensors

- THERMOVAC
- TTR 100
 - TTR 211
 - TTR 216 S
 - TTR 90
 - TTR 90 S
 - TTR 91
 - TTR 91 S
 - TTR 96 S
- PENNINGVAC
- PTR 90



Dimensional drawing and panel cut-out for the DISPLAY ONE

4-20mA Sensor Brick

Overview



4~20mA Sensor Brick is an electronic brick module that can be used to test electronic current loop from 4mA to 20mA and support type2,3,4 current output. With a 5V to 24V DC-DC power boost convertor, its max current output can be 150mA, which can be for equipment use.

Features

- Compatible with the mainstream 2.54 and 4-pin Grove interface in market
- Compatible with type2,3,4 electronic current loop
- With use of M4 standard fixed holes, compatible with M4-standard kits such as Lego and Makeblock.

Specification

PCB size	40.6mm X 29mm X 1.6mm
Power supply	5V DC
Compatible interfaces	2.54 4-pin interface and 4-pin Grove interface(1)



Pirani Standard Gauge

PSG500-S, PSG502-S,
PSG510-S, PSG512-S



Operating Manual
Ind. EC Declaration of Conformity

tina44e1-g (2010-06)

Product Identification

In all communications with INFICON, please specify the information on the product nameplate. For convenient reference copy that information into the space provided below.

INFICON AG, LI-8496 Balzers

Model: _____
PN: _____
SN: _____
_____ V _____ W



Validity

This document applies to products with the following part numbers:

PSG500	PSG500-S (W filament)
350-060	350-060 (DN 16 ISO-KF)
350-062	350-062 (DN 16 CF-R)
350-061	350-061 (1/8" NPT)
350-064	350-064 (8 VCR [®])
350-065	350-065 (4 VCR [®])
350-063	350-063 (1/2"-Rohr)
350-066	350-066 (7/16-20 UNF)
350-067	350-067 (DN 16 ISO-KF long tube)
350-068	350-068 (DN 16 CF-R long tube)

PSG502-S (Ni filament)

350-140	(DN 16 ISO-KF)
350-142	(DN 16 CF-R)
350-141	(1/8" NPT)
350-144	(8 VCR [®])
350-145	(4 VCR [®])
350-143	(1/2"-Rohr)
350-146	(7/16-20 UNF)
350-147	(DN 16 ISO-KF long tube)
350-148	(DN 16 CF-R long tube)

PSG510-S (W filament)	PSG512-S (Ni filament)
350-200 (DN 16 ISO-KF)	350-300 (DN 16 ISO-KF)

The part number (PN) can be taken from the product nameplate.

If not indicated otherwise in the legends, the illustrations in this document correspond to the gauge with part number 350 060. They apply to gauges with other part numbers by analogy.

We reserve the right to make technical changes without prior notice.

All dimensions in mm.

Intended Use

The Pirani Standard Gauges PSG500-S, PSG502-S, PSG510-S, PSG512-S have been designed for vacuum measurement of gases in the pressure range of 5×10^{-4} ... 1000 mbar.

They must not be used for measuring flammable or combustible gases in mixtures containing oxidants (e.g. atmospheric oxygen) within the explosion range.

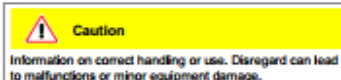
They can be operated in connection with an INFICON controller or with another controller.

Trademark

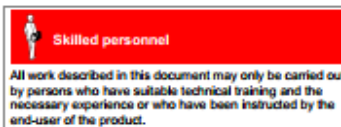
VCR[®] Swagelok Marketing Co.

Safety

Symbols Used



Personnel Qualifications



General Safety Instructions

- Adhere to the applicable regulations and take the necessary precautions for the process media used. Consider possible reactions between the materials and the process media. Consider possible reactions (e.g. explosion) of the process media due to the heat generated by the product.
 - Adhere to the applicable regulations and take the necessary precautions for all work you are going to do and consider the safety instructions in this document.
 - Before beginning to work, find out whether any vacuum components are contaminated. Adhere to the relevant regulations and take the necessary precautions when handling contaminated parts.
- Communicate the safety instructions to all other users.

Liability and Warranty

INFICON assumes no liability and the warranty becomes null and void if the end-user or third parties

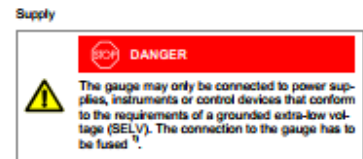
- disregard the information in this document
- use the product in a non-conforming manner
- make any kind of interventions (modifications, alterations etc.) on the product
- use the product with accessories not listed in the product documentation.

The end-user assumes the responsibility in conjunction with the process media used.

Gauge failures due to contamination or wear and tear, as well as expendable parts (filament), are not covered by the warranty.

Technical Data

Measurement principle	thermal conductance according to Pirani
Measurement range (air, O ₂ , CO, N ₂)	5×10^{-4} ... 1000 mbar
Accuracy (N ₂)	
1 × 10 ⁴ ... 100 mbar	±15% of reading
5 × 10 ⁴ ... 1 × 10 ⁵ mbar	±50% of reading
100 ... 1000 mbar	±50% of reading
Resolution	1% of reading
Repeatability	
1 × 10 ⁴ ... 100 mbar	2% of reading
Output signal (measurement signal)	
Voltage range	VDC 0 ... +10.3
Measurement range	VDC +1.9 ... +10.0
Voltage vs. pressure	logarithmic 1.286 W/decade
Error signal	V 0 ... +0.5
Filament rupture	V +0.1
Output impedance	Ω 2×4.7
Minimum loaded impedance	kΩ 10, short-circuit proof
Response time	ms 80
Gauge identification	27.0 kΩ, referenced to supply common (voltage at pin 4 ≤5 V)
Adjustment	one tactile switch for ATM and HV adjustment
Switching functions	SP1, SP2
Threshold value indication and setting	one tactile switch at measurement value output. Press briefly for threshold indication. Keep pressing or press repeatedly for threshold setting.
Setting range	2 × 10 ³ ... 500 mbar
Hysteresis	10% above lower threshold
Relay contact	30 V, 0.5 ADC, floating at low pressure (lamp is lit) at high pressure, error, missing supply
Supply	



Supply voltage	VDC +14 ... +30
At gauge	V _{ripple} ≤1
Ripple	
Current consumption	mA <500 (max. starting current)
Power consumption	W ≤1
Fuse required ¹⁾	AT 1 (slow)
Electrical connection	FCC 68 / RJ45 appliance connector, 8 poles, male
Sensor cable	8 poles plus shielding
Cable length	≤100 m (8×0.14 mm ²)
Grounding concept	→ "Electrical Connection" connected via 1 MΩ (voltage difference <15 V) conducted separately, for differential measurement
Materials exposed to vacuum	
PSG500-S, PSG502-S	DIN 1.4301, DIN 1.4305, DIN 1.4435, glass, Ni, NiFe
PSG510-S, PSG512-S	Al ₂ O ₃ (ceramics), Ni, DIN 1.4435, DIN 1.4305 DIN 1.3981
Filament	
PSG500-S, PSG510-S	W
PSG502-S, PSG512-S	Ni

¹⁾ INFICON controllers fulfill these requirements.

Technical Specification

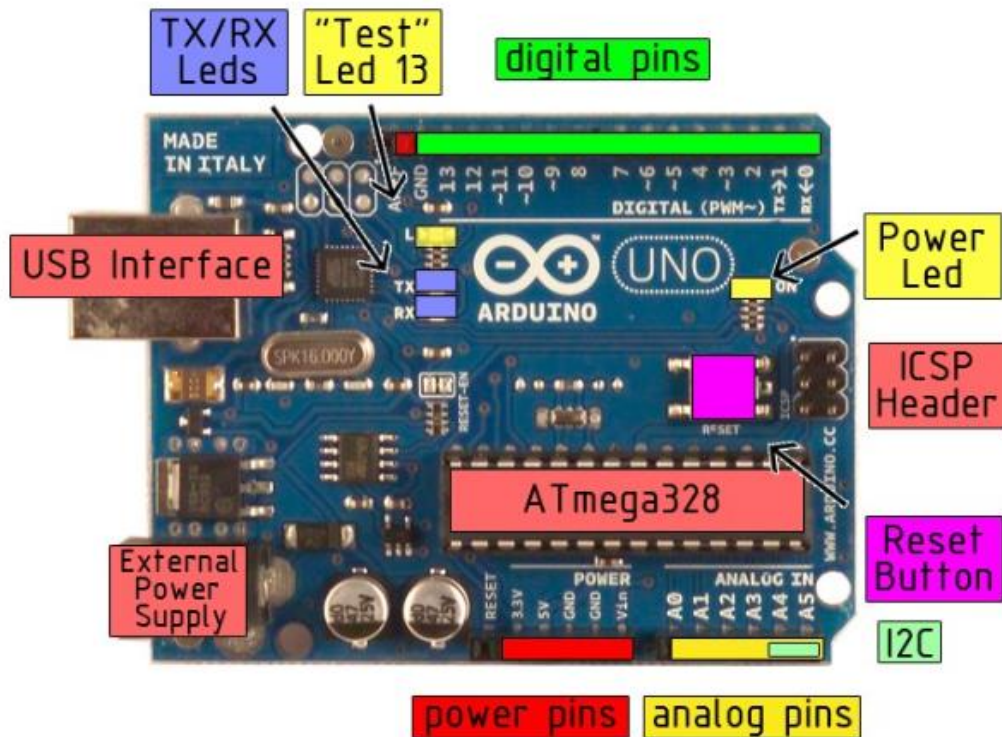


EAGLE files: [arduino-duemilanove-uno-design.zip](#) Schematic: [arduino-uno-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

the board





Model Number

UC2000-30GM-E6R2-V15

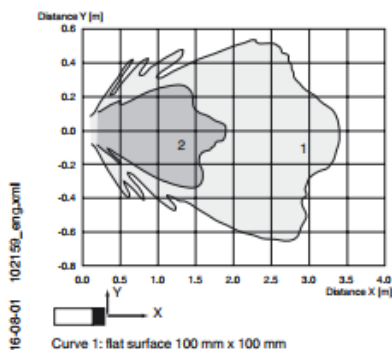
Single head system

Features

- Parameterization interface for the application-specific adjustment of the sensor setting via the service program ULTRA 3000
- 2 programmable switch outputs
- Hysteresis mode selectable
- Window mode selectable
- Synchronization options
- Adjustable acoustic power and sensitivity
- Temperature compensation

Diagrams

Characteristic response curve



Technical data

General specifications

Sensing range	80 ... 2000 mm
Adjustment range	120 ... 2000 mm
Dead band	0 ... 80 mm
Standard target plate	100 mm x 100 mm
Transducer frequency	approx. 180 kHz
Response delay	65 ms minimum 195 ms factory setting

Indicators/operating means

LED green	solid: Power-on flashing: Standby mode or program function object detected
LED yellow 1	solid: switching state switch output 1 flashing: program function
LED yellow 2	solid: switching state switch output 2 flashing: program function
LED red	solid: temperature/program plug not connected flashing: fault or program function object not detected
Temperature/TEACH-IN connector	Temperature compensation, Switch points programming, output function setting

Electrical specifications

Operating voltage U_B	10 ... 30 V DC, ripple 10 % _{SS}
No-load supply current I_0	≤ 50 mA

Interface

Interface type	RS 232, 9600 Bit/s, no parity, 8 data bits, 1 stop bit
----------------	--

Input/Output

Synchronization	bi-directional 0 level: $-U_B \dots +1$ V 1 level: $+4$ V $\dots +U_B$ input impedance: > 12 KOhm synchronization pulse: ≥ 100 μs, synchronization interpulse period: ≥ 2 ms
Synchronization frequency	≤ 30 Hz
Common mode operation	≤ 30 Hz
Multiplex operation	≤ 30 Hz / n, n = number of sensors, n ≤ 5

Output

Output type	2 switch outputs PNP, NO/NC, programmable
Rated operating current I_o	200 mA, short-circuit/overload protected
Voltage drop U_d	≤ 2.5 V
Repeat accuracy	≤ 0.1 % of full-scale value
Switching frequency f	≤ 2.5 Hz
Range hysteresis H	1 % of the adjusted operating range (default settings), programmable
Temperature influence	≤ 2 % from full-scale value (with temperature compensation) ≤ 0.2 %/K (without temperature compensation)

Ambient conditions

Ambient temperature	-25 ... 70 °C (-13 ... 158 °F)
Storage temperature	-40 ... 85 °C (-40 ... 185 °F)

Mechanical specifications

Connection type	Connector M12 x 1, 5-pin
Degree of protection	IP65
Material	
Housing	stainless steel (1.4305 / AISI 303) PBT plastic parts
Transducer	epoxy resin/hollow glass sphere mixture; polyurethane foam
Mass	140 g

Factory settings

Output 1	Switching point: 200 mm output function: Switch point operation mode output behavior: NO contact
Output 2	Switching point: 2000 mm output function: Switch point operation mode output behavior: NO contact

Compliance with standards and directives

Standard conformity	
Standards	EN 60947-5-2:2007+A1:2012 IEC 60947-5-2:2007 + A1:2012