

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Guilherme Henrique Ludwig

**Projeto de Fim de Curso
Medição não invasiva de volume de óleo em
compressores de refrigeração**

Florianópolis

2023

Guilherme Henrique Ludwig

**Medição não invasiva de volume de óleo em compressores
de refrigeração**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.
Orientador: Rodolfo César Costa Flesch
Coorientador: Murilo Ferreira Vitor

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ludwig, Guilherme Henrique

Medição não invasiva de volume de óleo em compressores de refrigeração / Guilherme Henrique Ludwig ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch, coorientador, Murilo Ferreira Vitor, 2023.

44 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Medição não invasiva de nível. 3. Instrumentação. 4. Eletrônica. I. Flesch, Rodolfo César Costa . II. Vitor, Murilo Ferreira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Guilherme Henrique Ludwig

Medição não invasiva de volume de óleo em compressores de refrigeração

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação Florianópolis, 10 de julho de 2023.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/DAS

João Paulo Zomer Machado, Eng.
Supervisor
LIAE

Eng. Diogo Ortiz Machado, Dr.
Avaliador
IFRS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/DAS

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Sandro e Keilla, pelo apoio incondicional durante toda a graduação, não me deixando desistir nos momentos mais difíceis. Vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Amo vocês e espero retribuir um dia todas as riquezas que me transmitiram.

À minha família, em especial à minha avó e bisavó, Ozeli e Benta, que sempre sonharam em me ver graduado. Sempre se colocaram como segundas mães, tendo todo o meu amor.

Aos meus amigos de laboratório, Gustavo, Gabriel, João Paulo, Caio e Cassiano, por todo o suporte e contribuição com o projeto. É uma honra dividir meu espaço de trabalho com vocês.

À minha namorada Djenifer, pela paz e amor que me traz em todos os momentos. Sou muito feliz por poder dividir a vida contigo.

Ao meu co-orientador Murilo, que tornou possível a realização deste trabalho, empregando tempo e dedicação imensuráveis.

Ao Antônio Luiz Pacheco, por todo o suporte com o desenvolvimento do projeto eletrônico, além de ter me dado a possibilidade de aprendizado com alguém de tamanha experiência. Sou muito grato pelo tempo despendido para me auxiliar.

Ao meu orientador, professor Rodolfo Flesch, que me trouxe de volta a motivação necessária para seguimento na carreira de engenheiro depois de um período conturbado de pandemia. Se apresento este trabalho hoje, é graças à primeira oportunidade que me foi dada pelo senhor.

A todos os professores com os quais tive o prazer de dividir a sala de aula durante a graduação. Espero um dia chegar perto de onde chegaram, servindo de espelho para todos os estudantes.

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 30 de junho de 2023.

Na condição de representante do Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaaios no qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor Guilherme Henrique Ludwig, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa nº 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

João Paulo Zomer Machado
Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaaios

Resumo

Este trabalho introduz um novo método não invasivo de estimação do nível de óleo em compressores herméticos. A motivação por trás do desenvolvimento de um novo método surge da limitação que os atuais procedimentos de medição de nível de óleo, utilizados em laboratório, acarretam para a Nidec, empresa para a qual o trabalho foi desenvolvido. Para avaliação da possibilidade do emprego da capacitância para estimação de nível, um estudo simulacional foi realizado utilizando o software *COMSOL Multiphysics*. Após isso, mediante utilização de equipamentos adequados de medição, levantou-se a relação entre o nível de óleo presente no interior de uma série de compressores herméticos de diferentes modelos e a respectiva capacitância medida, que é transcrita em modelos matemáticos específicos para cada compressor. Para avaliação do efeito da temperatura na medição, foi projetado um sistema de controle térmico, possibilitando a realização dos ensaios, nos quais verificou-se que a influência da temperatura no valor medido de capacitância possui relação direta com o nível de óleo presente no interior do compressor. Ainda, um sistema eletrônico foi desenvolvido com o objetivo de automatizar a medição do nível de óleo. Os resultados iniciais mostram que o método proposto pode ser empregado para tal finalidade, com erro máximo de 2 mL quando utilizado o modelo que descreve a relação entre nível de óleo e capacitância específica do compressor, suplementando, num primeiro momento, os atuais métodos de estimação de nível de óleo em equipamentos herméticos utilizados em ambiente de laboratório. O documento possui apenas os dados autorizados pela Nidec para publicação.

Palavras-chave: Nível de óleo. Medição de capacitância. Compressor hermético. Medição não invasiva.

Abstract

This work introduces a new non-invasive method for estimating the oil level in hermetic compressors. The motivation behind the development of this new method arises from the limitations that the current oil level measurement procedures used in the laboratory impose on Nidec, the company for which this work was developed. To evaluate the feasibility of employing capacitance for level estimation, a simulation study was conducted using the software *COMSOL Multiphysics*. Subsequently, by using appropriate measurement equipment, the relationship between the oil level inside a series of different models of hermetic compressors and the corresponding measured capacitance was determined. This relationship is then transcribed into specific mathematical models for each compressor. To assess the effect of temperature on the measurement, a thermal control system was designed, enabling the execution of tests that revealed a direct correlation between the temperature influence on the measured capacitance value and the oil level inside the compressor. Additionally, an electronic system was developed with the aim of enabling the automatic oil level measurement. The initial results show that the proposed method can be employed for this purpose, with a maximum error of 2 mL when using the model that describes the specific relationship between oil level and capacitance for the compressor. This method initially complements the current oil level estimation methods used in laboratory environments for hermetic equipment. The document contains only the data authorized by Nidec for publication.

Key-words: Oil level. Capacitance measurement. Hermetic compressor. Non-invasive measurement

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de compressor hermético.	14
Figura 2 – Método Radar de Espaço Livre para medição do nível de líquidos. . .	18
Figura 3 – Método radioativo para medição do nível de líquidos.	19
Figura 4 – Método ultrassônico para medição do nível de líquidos.	20
Figura 5 – Método capacitivo para medição do nível de líquidos.	21
Figura 6 – Esquemático representando um sensor capacitivo de geometria cilíndrica	23
Figura 7 – <i>Liquicap FMI51</i>	24
Figura 8 – <i>VEGACAL 62</i>	25
Figura 9 – <i>SC750</i>	26
Figura 10 – Camada de proteção para situações em que IO1 e IO2 estejam em nível lógico alto simultaneamente.	28
Figura 11 – Camada de proteção para situações em que IO1 e IO3 estejam em nível lógico alto simultaneamente.	29
Figura 12 – Camada de proteção de descarga dos enrolamentos do compressor. . .	30
Figura 13 – Inserção dos transformadores para verificação de nível seguro de tensão	30
Figura 14 – Circuito de retificação de precisão.	31
Figura 15 – Circuito de atraso e comparação de sinal.	32
Figura 16 – Habilidade da alimentação do circuito de chaveamento da medição de capacitância.	32
Figura 17 – Conexão do fio fase ao protetor térmico do compressor.	33
Figura 18 – Trecho de circuito responsável pelo chaveamento da medição de capaci- tância.	34
Figura 19 – Trecho de circuito responsável pelo chaveamento do acionamento do compressor.	35
Figura 20 – Sinal senoidal de 0,5 V de amplitude retificado.	37
Figura 21 – Visualização 3D da PCB no Altium Designer.	39
Figura 22 – PCB desenvolvida no projeto.	40

Sumário

	Introdução.	10
1	MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROJETO.	13
2	LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS (LIAE).	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E SOLUÇÕES COMERCIAIS.	17
3.1	Métodos avaliados	17
3.1.1	Princípio de medição Radar de Espaço Livre	17
3.1.2	Princípio de medição por raios gama	19
3.1.3	Princípio de medição por ultrassom	19
3.1.4	Princípio de medição por capacitância	20
3.2	Modelo fenomenológico	22
3.3	Sensores comerciais de nível do tipo capacitivo	23
4	DESENVOLVIMENTO.	27
4.1	Camadas de proteção do circuito	27
4.2	Camada de chaveamento	33
4.3	Dimensionamento do circuito	33
4.4	Projeto da placa de circuito impresso	38
5	ANÁLISE CRÍTICA E CONCLUSÕES.	41
	REFERÊNCIAS.	42

Introdução

A medição de nível de líquidos em reservatórios e equipamentos é uma tarefa comum no ambiente industrial, com aplicações que vão desde o simples monitoramento até a possibilidade de criação de laços de realimentação em malhas de controle, buscando garantir, entre outras coisas, a segurança e a otimização de processos (LOIZOU; KOUTROULIS, 2016). No ambiente industrial, são encontradas aplicações nos mais diversos ramos, como nas indústrias química, de petróleo, de fertilizantes e automotiva, nas quais o monitoramento do nível de líquido dentro do tanque de armazenamento é relevante para detectar vazamentos e evitar transbordamentos e acidentes, visto que esses líquidos podem ser perigosos ou inflamáveis (SINGH; RAGHUWANSHI; KUMAR,2019). Ainda, essa prática é comum em cenários do cotidiano, como na verificação do nível de combustível em veículos e reservatórios de postos de combustível, bem como na verificação do nível de óleo lubrificante em aplicações aeroespaciais (ATTIVISSIMO et al.,2023). Também, é importante nas relações comerciais, já que possibilita maior segurança em casos de transferência de custódia, nos quais há estimativa do volume negociado por meio da medição de nível. Na área específica de petróleo, há um estudo que mostra que, devido ao alto volume negociado, erros de 0,25% na medição podem resultar em uma variação no balanço de 15 000 dólares norte-americanos por dia, resultando em 5,5 milhões de dólares ao ano a favor de uma ou outra empresa (DUPUIS; HWANG,2010). Um outro exemplo de aplicação é a utilização da medição de nível de líquido na área médica para monitorar a vazão de injeção intravenosa, fornecendo informações importantes à equipe (GONG et al.,2016;SALMAZ; AHSAN; ISLAM,2021).

Considerando as especificidades em diversos campos, é necessária a utilização de uma tecnologia adequada para a medição dessa grandeza em cada aplicação específica. De fato, até então, surgiram diferentes métodos para realizar esse tipo de tarefa, diferindo-se nos princípios utilizados na medição, sendo o emprego dependente da característica do processo e do tipo de material cujo conhecimento do nível é necessário (SINGH; RAGHUWANSHI; KUMAR,2019). As técnicas de medição de nível e volume de líquidos geralmente são baseadas em transdutores resistivos, indutivos, capacitivos, piezoelétricos, ultrassônicos ou de fibra óptica (SINGH et al.,2011;FRADEN,2003). O trabalho apresentado neste documento baseia-se em um método capacitivo para estimação de nível.

Sensores do tipo capacitivo podem ter vários formatos, de forma que buscam simular um capacitor ideal. O princípio de operação é o mesmo de um capacitor convencional, no qual dois condutores são separados por um material, nesse caso um líquido, que pode ser isolante ou condutor. A variação de capacitância possui relação direta com o tipo de líquido utilizado entre as placas metálicas, além da quantidade presente (HALLIDAY;

[RESNICK; WALKER,2013](#)). Portanto, a ideia fundamental por trás desses sensores é converter mudanças de nível em um sinal elétrico capaz de ser lido e processado por um sistema de aquisição de dados. Assim, conhecendo as propriedades do capacitor, pode-se estimar o nível de líquido em tanques de armazenamento ou sistemas herméticos, como motores e compressores de refrigeração, por exemplo. O uso desse tipo de método para medições de nível de líquidos apresenta as seguintes vantagens: baixo custo (ou seja, os sensores podem ser construídos com tecnologias acessíveis), baixo consumo de energia, alta linearidade e fácil ajuste à geometria da aplicação ([REVERTER; LI; MEIJER,2007](#)). Entretanto, trata-se de uma grandeza cuja medição é sujeito a interferências do meio, sendo afetada por parâmetros indesejados, como a capacitância do cabo, variações devido à temperatura ou capacitâncias parasitas criadas entre o sensor e objetos próximos ([LOIZOU; KOUTROULIS,2016](#)).

Os métodos de medição descritos anteriormente podem ser divididos em dois grupos ([LOIZOU; KOUTROULIS,2016](#)). O primeiro refere-se aos métodos invasivos de medição, os quais tornam necessárias mudanças físicas do meio, como a inserção de uma haste metálica em um tanque de armazenamento, configurando-se no que seria um par de placas de um capacitor. Para este caso, diversos tipos de sensores foram desenvolvidos, especialmente para medição de nível de água. Eletrodos fabricados em placas de circuito impresso foram projetados por [Chetpattananondh et al.\(2014\)](#) para se comportar como um sensor de nível capacitivo, com objetivo principal de medir a elevação do nível da água a fim de evitar enchentes. Um outro sensor do tipo capacitivo foi apresentado por [Bera et al.\(2014\)](#), consistindo de dois enrolamentos não indutivos de duas camadas montados em cilindros coaxiais imersos no líquido, que estava contido em um tanque de armazenamento metálico. Já o segundo grupo refere-se aos métodos não-invasivos de medição, que, como o nome sugere, não demandam alterações estruturais no meio onde se deseja realizar as medições. No trabalho de [Hamanaka, Segundo e Silva\(2017\)](#), foi desenvolvido um transdutor não invasivo, de baixo custo e fácil instalação para aplicações em tanques de combustível de um modelo específico para aplicação em motores a combustão. O transdutor consiste em três tarugos de cobre fabricados em uma placa de circuito impresso, separados com o mesmo espaçamento, formando um arranjo triangular. Cada tarugo funciona como um eletrodo do elemento sensor e os três são alocados em três orifícios presentes no tanque avaliado. Na mesma placa está alojado um circuito integrado temporizador, cuja função é realizar a conversão da variação da capacitância em um sinal com frequência inversamente proporcional, que depende diretamente, da variação da quantidade dos dois dielétricos presentes no tanque: ar e combustível.

A definição de qual será o método escolhido se baseia, necessariamente, nas características do sistema no qual se deseja conhecer o nível de líquido. Os objetos principais de estudo deste trabalho são os compressores herméticos. Tal característica, pelo fato de não oferecer a possibilidade de manuseio e visualização dos componentes internos do

equipamento, torna a medição de grandezas de componentes internos desses sistemas uma tarefa um pouco mais desafiadora. Tipicamente, em aplicações mais simples, utiliza-se uma balança para, tendo o peso do sistema vazio, associar a massa extra ao volume de líquido (no caso, óleo), cuja densidade é conhecida. Em outros casos, sobretudo em ambientes de laboratório, insere-se um visor graduado em algum ponto do equipamento. Ambos os casos abordados não facilitam o desenvolvimento de um sistema automático de medição e aquisição de dados, o que é um empecilho na realização de estudos mais aprofundados sobre diferentes configurações de operação desses sistemas, por exemplo.

Este trabalho tem como objetivo geral propor um método não invasivo de medição de nível de óleo em compressores herméticos. Para isso, foram definidos alguns objetivos específicos. Dentre eles, destaca-se o desenvolvimento de um sistema eletrônico com o objetivo de automatizar os ensaios mesmo quando o compressor é operado.

O documento trata-se de uma versão livre, contendo apenas o conteúdo autorizado pela empresa. O texto está organizado como segue. No Capítulo 1 é apresentada a motivação para o desenvolvimento do projeto, assim como sua descrição. No Capítulo 2 é apresentado o Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE), no qual o trabalho foi desenvolvido. No Capítulo 3 é descrita a fundamentação teórica por trás do projeto, abordando os métodos de medição de nível avaliados e o modelo fenomenológico que descreve a capacitância em um capacitor. No Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento da placa eletrônica responsável pela automatização dos ensaios. No Capítulo 5 é feita uma análise crítica do que foi desenvolvido e é apresentada a conclusão geral do trabalho.

1 Motivação e descrição do projeto

O projeto *Medição não invasiva de volume de óleo em compressores de refrigeração*, descrito neste documento, tem como motivação principal a necessidade da Nidec GA (empresa fomentadora do projeto) possuir, em ambiente de laboratório, uma alternativa aos métodos de medição de nível atualmente empregados. Hoje, utilizam-se balanças com o objetivo de calcular o nível de óleo presente por meio da medição da massa do compressor. Em outros casos, a estrutura dos compressores é alterada com a inserção de um visor graduado na lateral da carcaça. Ambas as alternativas dificultam a automação de ensaios que buscam caracterizar o comportamento do equipamento quando sujeito a diferentes condições de operação, por exemplo. O desenvolvimento de um novo método traz as seguintes vantagens:

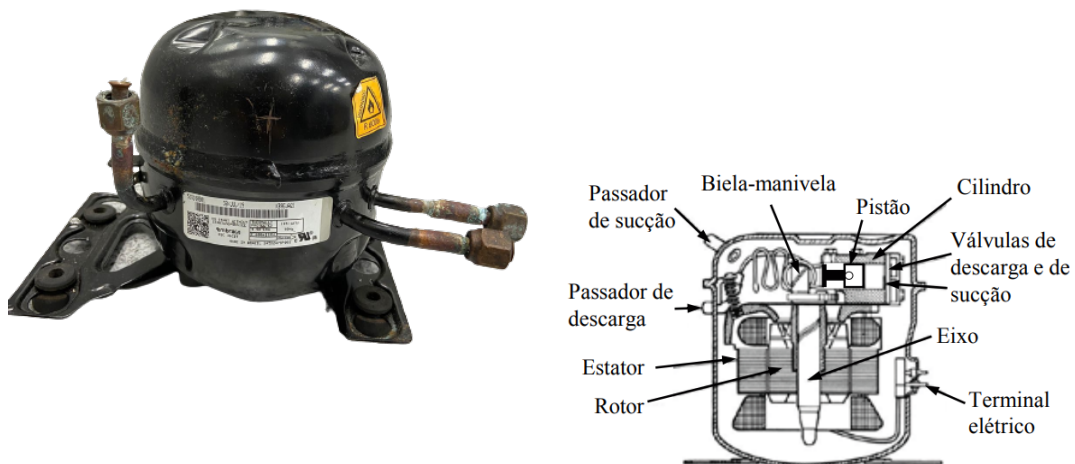
- permitir identificar casos em que o compressor funciona com carga de óleo diferente da nominal (falta ou excesso);
- permitir avaliar possíveis causas de falhas (retorno de refrigerante líquido durante o degelo, por exemplo, uma vez que o acréscimo de fluido refrigerante no interior do compressor deve alterar a capacitância medida pelo sistema (SEDREZ,2014));
- identificar o nível máximo e mínimo de óleo admitido no compressor sem que haja perda de desempenho.

No momento que o escopo do projeto foi concebido, tinha-se o objetivo de desenvolver um sistema portátil para utilização do método em diferentes ambientes, como em casos de atendimento ao cliente, por exemplo. Entretanto, optou-se por, inicialmente, encontrar uma solução cujo uso é destinado para ambientes de laboratório, os quais possuem condições controladas de operação (temperatura, por exemplo) e pessoal especializado.

O principal objeto de estudo deste trabalho é o compressor de refrigeração. Um compressor é um importante componente em circuitos de refrigeração (TOPRAK; IFTAR, 2007). Dentre os dispositivos básicos, considera-se o compressor como o coração do sistema de compressão de vapor (MATOS,2017), podendo ser definido como equipamentos projetados para aumentar a pressão de um fluido em estado gasoso (STOECKER W.; JONES, 1985). Esses equipamentos, segundo o ponto de vista construtivo, podem ser divididos em: herméticos, semi-herméticos e abertos. Nos compressores herméticos, equipamentos sobre os quais os estudos deste trabalho se concentram, o mecanismo de compressão é acoplado a um motor elétrico e ambos são posicionados no interior de um corpo hermeticamente selado, não acessíveis para reparo ou manutenção (HUNDY G.; TROTT,2008). Um exemplo de

compressor hermético pode ser visualizado na Figura1a, bem como um esquemático da sua vista em corte na Figura1b.

Figura 1 – Exemplo de compressor hermético



(a) Compressor hermético modelo ESC36 CBT (b) Representação de vista em corte de um compressor hermético

Fonte: a) Arquivo pessoal e b) adaptado de Bloch e Hoefner (1996)

Grande parte dos modelos de compressores herméticos necessitam de óleo lubrificante. Entre suas funções, o óleo lubrificante, que circula no interior a partir da ação da força centrífuga gerada pelo movimento das partes móveis do equipamento (MATOS, 2017), é responsável pelo aumento da confiabilidade, eficiência e vida útil do compressor, além de auxiliar em outras funções como arrefecimento, vedação entre pistão e cilindro e redução de ruído (PRATA; JR., 2009).

Para cumprir seu papel no circuito de compressão, é necessário que o nível de óleo no compressor esteja dentro da faixa sugerida pelo fabricante. Cenários de operação com falta ou excesso de óleo podem provocar a diminuição da eficiência do compressor, além de danificá-lo. Por isso, torna-se importante o conhecimento de métodos de medição de nível de óleo, especialmente aqueles que podem ser utilizados em dispositivos herméticos.

Para que o uso do novo método se torne factível, uma vez que algumas alternativas já são empregadas em ambientes de laboratório, é necessário que o novo sistema seja de fácil uso. Ainda, a aplicação do método não deve exigir alterações no local em que serão realizadas as medições.

Por se tratar de um novo método de medição, é importante entender as relações

existentes entre a capacitância e algumas variáveis, especialmente a temperatura a qual o compressor é submetido, tanto a temperatura ambiente quanto a temperatura interna do equipamento. Isso é importante pois, quando ligado, devido ao atrito gerado pelo movimento das partes móveis e às perdas elétricas no estator, há um aumento na temperatura do compressor, o que pode influenciar na medição. O trabalho precisa, ainda, avaliar o impacto do contato do compressor com outros materiais, especialmente metálicos, que devem influenciar com o acréscimo de capacitâncias parasitas na medição, podendo descaracterizá-la. Ainda, julgou-se relevante conhecer o comportamento da medição de capacitância após o compressor ter sido desligado, já que deve haver óleo escorrendo pela superfície interna da carcaça, devido à força centrífuga gerada pelo rotor.

Para acelerar o procedimento de medição nos períodos em que o compressor encontra-se desligado, previu-se, no início do projeto, o desenvolvimento de um circuito eletrônico responsável pela automação do processo de medição.

2 Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE)

O Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios (LIAE), onde foi desenvolvido o trabalho apresentado neste documento, foi criado em 2007 e tem atuação multidisciplinar englobando diversas áreas das engenharias mecânica, elétrica e de controle e automação. O laboratório atua em projetos com foco em aplicações industriais nas seguintes linhas de atuação:

- automação e aplicação de técnicas de controle em ensaios;
- desenvolvimento de equipamentos eletrônicos e eletromecânicos para medição, atuação e controle;
- avaliação e garantia da confiabilidade metrológica;
- inteligência artificial aplicada à metrologia industrial;
- processamento digital de sinais aplicado à medição.

Nesse laboratório trabalham alguns egressos do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Mecânica, hoje mestrandos, doutorandos e pesquisadores em suas áreas. Esses profissionais contribuíram diretamente com o desenvolvimento do trabalho por meio de troca de experiências passadas, uma vez que o escopo do desenvolvimento do método passa, necessariamente, pelo desenvolvimento de softwares, eletrônica e controle, áreas de conhecimento comum do grupo. O laboratório possui contratos de desenvolvimento de tecnologias ligados à área de refrigeração com o grupo Nidec GA, que é, hoje, o maior fabricante de motores do mundo, possuindo 330 empresas em 34 países e um quadro de colaboradores que ultrapassa o número de 110 mil pessoas.

Além do desenvolvimento tecnológico, o LIAE possui foco na geração de conhecimento científico, tendo produzido, ao longo dos anos, diversos artigos e trabalhos publicados em periódicos e congressos nacionais e internacionais. Algumas dessas produções, inclusive, contaram com atuação direta de bolsistas de graduação, evidenciando o compromisso do laboratório na formação de novos cientistas.

3 Fundamentação teórica e soluções comerciais

Este capítulo descreve os conceitos necessários para o entendimento deste trabalho. A Seção 3.1 apresenta a avaliação realizada acerca dos métodos que foram avaliados para verificação do nível de óleo em compressores herméticos, a Seção 3.2 descreve o modelo fenomenológico que define o valor da capacitância em capacitores e a Seção 3.3 apresenta uma revisão acerca dos sensores de nível do tipo capacitivo disponíveis no mercado.

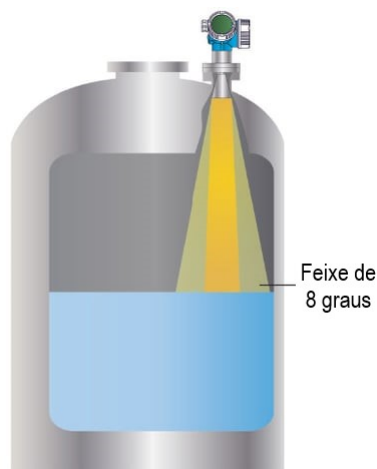
3.1 Métodos avaliados

No início do projeto, foi necessário escolher o princípio de medição que seria utilizado para estimação do nível de óleo. Por se tratar de um equipamento hermético, é essencial que o método permita medições não invasivas. Assim, foram avaliados quatro princípios de medição, sendo cada um detalhado em uma subseção correspondente. A descrição de cada um dos métodos baseou-se num artigo de [Henry \(2015\)](#).

3.1.1 Princípio de medição Radar de Espaço Livre

O primeiro método avaliado refere-se ao princípio de medição com emprego de radar. A Figura 2 ilustra o funcionamento do método, no qual o sensor envia um sinal eletromagnético que pode tanto refletir na superfície quanto sofrer um deslocamento de frequência para determinar o nível.

Figura 2 – Método Radar de Espaço Livre para medição do nível de líquidos



Fonte: Adaptado de Henry(2015)

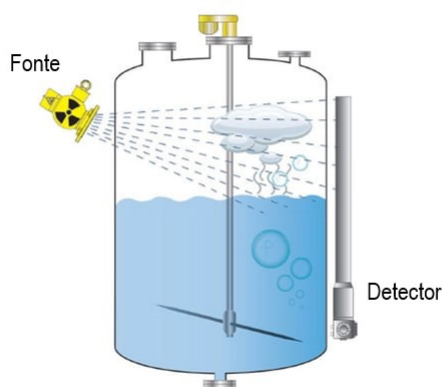
Tal método pode operar com dois mecanismos: eco, ou seja, medição do tempo entre os pulsos transmitido e refletido e onda modulada em frequência (FMCW, do inglês *Frequency Modulated Continuous Wave*), que pode alterar sua frequência de operação durante a medição. Nesse último são medidas as diferenças de fase, ou frequência, entre o sinal modulado efetivamente transmitido e o sinal recebido, de forma que o sinal transmitido é alterado linearmente durante um determinado tempo. Devido ao atraso de tempo decorrido durante a propagação do sinal, varia-se a frequência de transmissão, gerando uma diferença quando comparada com a frequência do sinal recebido naquele mesmo momento, obtendo-se um sinal de baixa frequência Δ_f , sendo Δ_f proporcional à distância até a superfície do fluido (ou sólido) (BEGA et al.,2006). Tipicamente, com o emprego desse método, a precisão nos resultados é na ordem de micrometros, em casos nos quais não há a presença de uma parede metálica entre o sensor e o líquido, ou seja, diferente do que se encontra num compressor hermético. A reflexão da onda ocorre pela diferença da constante dielétrica entre os meios, que é afetada pela temperatura e pela frequência do sinal eletromagnético gerado (BEGA et al.,2006). No caso, quanto maior for a constante dielétrica do material (único parâmetro relativo às propriedades do material que influencia na medição), mais fácil é a medição de nível e vice-versa (BEGA et al., 2006). Ainda, a intensidade do sinal refletido é inversamente proporcional à distância a ser medida e diretamente proporcional ao tamanho da antena utilizada.

Entretanto, esse método possui algumas desvantagens associadas, principalmente por conta da natureza da operação de medição de nível em compressores. No caso, o alto custo e a provável dificuldade de penetração da onda na carcaça metálica do compressor fizeram com que não se priorizasse esse método no momento da escolha do tipo de tecnologia empregada para a medição de nível de óleo.

3.1.2 Princípio de medição por raios gama

Esta tecnologia trata-se de um método não invasivo de medição e é composta por dois componentes: uma fonte radioativa e um detector, como ilustra a Figura 3. A fonte radioativa é montada em um recipiente de proteção preenchido com chumbo, que possui apenas uma pequena lente (ou abertura) para direcionar a radiação gama em uma direção. Em uma aplicação de nível contínuo, quando o recipiente está cheio, apenas uma quantidade muito pequena de radiação é detectável no lado oposto do recipiente, onde o detector está montado. A quantidade de radiação aumenta à medida que o nível do recipiente diminui.

Figura 3 – Método radioativo para medição do nível de líquidos



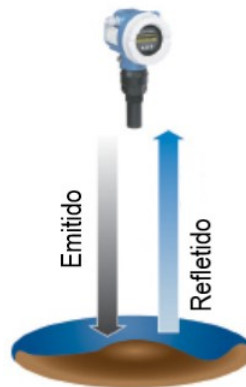
Fonte: Adaptado de [Henry\(2015\)](#)

Essa tecnologia pode ser usada em ambientes extremos, incluindo altas temperaturas, meios corrosivos, altas pressões e materiais tóxicos ou abrasivos. Entretanto, por se tratar de uma fonte de radiação, uma série de normas necessitam ser cumpridas para operação de um sensor que emprega esse tipo de tecnologia. O método possui alto custo atrelado, seja para implementação ou para manutenção. Além disso, não há estrutura adequada para operar com radiação nas dependências do LIAE.

3.1.3 Princípio de medição por ultrassom

O princípio de medição por ultrassom é bastante semelhante ao descrito na subseção 3.1.1, com a diferença que, neste caso, o transdutor gera ondas mecânicas, ao invés de ondas eletromagnéticas, que são refletidas quando há contato com o líquido (ou interface entre líquidos, a depender do cenário). A Figura 4 ilustra a operação de transdutores que operam segundo esse princípio, no qual o sensor calcula o tempo de trânsito entre os pulsos emitido e refletido.

Figura 4 – Método ultrassônico para medição do nível de líquidos



Fonte: Adaptado de Henry(2015)

A distância entre o referencial do sensor e a interface do líquido pode ser definida por:

$$D = \frac{V_s t}{2}, \quad (3.1)$$

sendo D a distância de interesse, V_s a velocidade de propagação da onda ultrassônica e t é o tempo entre pulso o emitido e o retorno do pulso refletido.

Transdutores que operam segundo esse princípio necessitam de um meio para que a onda se propague, ou seja, não operam no vácuo. Quando a onda ultrassônica incide sobre a interface de duas substâncias de densidades diferentes (óleo e ar, por exemplo), é gerada uma onda proveniente da reflexão na interface (denominada onda refletida) e uma onda proveniente da mudança do meio de propagação (denominada onda refratada) (BEGA et al.,2006).

Para o correto funcionamento do método, é fundamental que o transdutor seja instalado perpendicularmente à superfície do produto cujo nível está sendo medido (BEGA et al.,2006). Caso haja desalinhamento, haverá piora na eficácia do instrumento, já que as ondas possuem o mesmo ângulo de propagação.

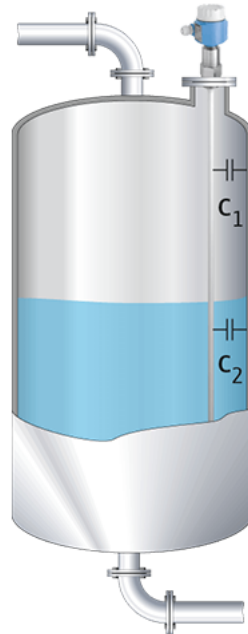
Como principais desvantagens do uso desse método, merecem destaque o alto custo associado e a interferência na medição da impedância acústica do meio. Além disso, não há garantia da existência de uma região na qual a onda possa ser refletida apenas no líquido, pelo fato de o trabalho ter o foco na medição de nível de óleo em compressores herméticos.

3.1.4 Princípio de medição por capacitância

Um transdutor de nível por capacitância funciona de maneira semelhante a um capacitor. A Figura 5 ilustra um tipo de transdutor que opera segundo esse princípio, onde C_1 e C_2 representam as capacitâncias existentes entre a haste do transdutor e as paredes

do reservatório, que são afetadas pelo meio dielétrico presente no interior, no caso ar e água, respectivamente.

Figura 5 – Método capacitivo para medição do nível de líquidos



Fonte: (IMKO,2023)

O princípio de medição é como o descrito no capítulo introdutório deste documento. A haste central de metal da sonda atua como uma das placas do capacitor. Já a parede do recipiente atua como a segunda placa. Se o material a ser medido for não condutor, ele atua como o isolante dielétrico entre as duas placas. Se o material a ser medido for condutor, é necessário que a sonda seja revestida totalmente com teflon ou material isolante similar, já que, nesse caso, o revestimento da sonda será o dielétrico, enquanto o fluido atuará como a outra placa do capacitor (BEGA et al.,2006). O recipiente é essencialmente transformado em um capacitor variável. Quanto mais líquido estiver em contato com a sonda, maior será a capacitância medida (tipicamente em picofarads).

O método possui algumas vantagens associadas. Inicialmente, possui um baixo custo. Para aplicação em compressores, não é necessário que seja introduzida uma sonda no equipamento. Desta forma, para que o método em questão seja avaliado como uma possível solução para medição de nível de óleo, precisa-se, inicialmente, apenas de um sistema de aquisição capaz de medir capacitância. Como há equipamentos disponíveis para realizar medição de capacitância no laboratório, o que gera uma economia grande no estudo da aplicação do método, concluiu-se que o princípio de medição por capacitância pode ser utilizado para desenvolver um novo método de medição de nível de óleo em compressores herméticos.

3.2 Modelo fenomenológico

O trabalho desenvolvido neste documento baseia-se na relação que há entre a capacitância e algumas características construtivas do capacitor, como a área das superfícies e a quantidade de dielétrico presente. Define-se um capacitor como um dispositivo elétrico que permite armazenar energia potencial em um campo elétrico, sendo formado por dois condutores, isolados entre si e do ambiente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013). Este dispositivo tem como principal característica a propriedade de armazenar cargas elétricas, opondo-se a variações na tensão do circuito no qual está instalado (BEGA et al., 2006).

Num capacitor carregado, os dois condutores contêm cargas de mesmo valor absoluto q , de forma que:

$$q = CV, \quad (3.2)$$

sendo C a constante de proporcionalidade, chamada de capacitância, e V a diferença de potencial entre os condutores. Para o cálculo da capacitância, deve-se (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013):

- supor que exista uma carga q entre os condutores;
- calcular o campo elétrico \vec{E} presente em função da carga;
- calcular a diferença de potencial entre os condutores.

Assim, através da lei de Gauss, tem-se:

$$\Phi_E = \frac{q}{k\varepsilon_0}, \quad (3.3)$$

sendo Φ_E o fluxo elétrico através de uma superfície fechada S que envolve um volume definido, k a constante dielétrica relativa e ε_0 a constante dielétrica do vácuo. O fluxo elétrico Φ_E é definido como a integral de superfície do campo elétrico:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}, \quad (3.4)$$

onde \vec{E} é o campo elétrico e $d\vec{A}$ é um vetor que representa um elemento infinitesimal de área da superfície. Para calcular a diferença de potencial entre os condutores, pode-se fazer a correlação com o campo \vec{E} calculado em (3.4), obtendo:

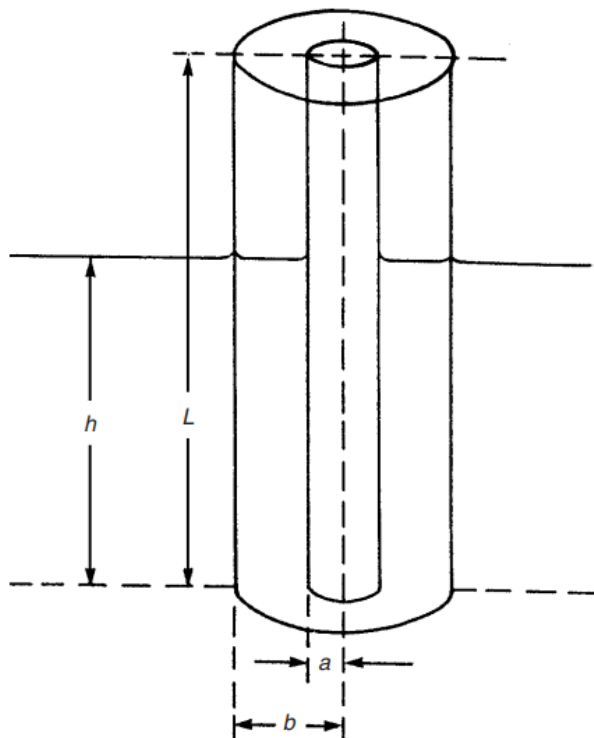
$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{S}, \quad (3.5)$$

sendo V_f a tensão final e V_i a tensão inicial, sendo $V = V_f - V_i$ a tensão entre as placas do capacitor. A integral descrita em (3.5) é calculada ao longo da trajetória que começa na superfície negativa e termina na superfície positiva, coincidindo com o campo elétrico. A capacitância, por sua vez, é calculada conforme a equação (3.2).

Em ambientes industriais, é comum o emprego deste princípio de medição para estimação do nível de líquidos em tanques de armazenamento. No caso de o líquido ser não-condutor, duas placas de metal, em formato de um cilindro concêntrico, são imersas no fluido, configurando-se como um capacitor. O líquido se comporta como um dielétrico entre as placas metálicas, que varia de acordo com o nível presente dentro do tanque. No caso da Figura6, sendo $b > a$ e L a altura do tanque, a altura de líquido pode ser associada à capacitância medida, de forma que (MORRIS,2001):

$$h = \frac{C \log_e \left(\frac{b}{a} \right) - 2\pi\epsilon_0}{2\pi\epsilon_0(k - 1)} \quad (3.6)$$

Figura 6 – Esquemático representando um sensor capacitivo de geometria cilíndrica



Fonte: (MORRIS,2001)

3.3 Sensores comerciais de nível do tipo capacitivo

A utilização da capacitância para medição de nível é uma prática já bastante difundida na indústria. Assim, há algumas soluções (produtos) comerciais disponíveis e que são utilizadas nos mais variados processos. Dentre os transdutores comercializados, encontra-se o *Liquicap FMI51*, da fabricante Endress+Hauser. O transdutor pode ser visualizado na Figura7. Para utilização em processos, algumas condições de aplicação devem ser observadas. Dentre elas, destacam-se:

- pressão suportada: vácuo a 100 bar;
- faixa de medição de nível: 0,1 m a 4 m;
- temperatura suportada: -80°C a 200°C ;
- possibilidade de utilização processos com líquidos corrosivos, devido ao material utilizado no revestimento da sonda.

Figura 7 – *Liquicap FMI51*

Fonte: (ENDRESS+HAUSER,2023)

Ainda, o sensor conta com um módulo conversor de valores de capacitância medidos para as respectivas unidades de volume ou distância desejadas. Isso ocorre graças ao transdutor possuir, via software embarcado, tabelas de linearização pré-programadas para cálculo do volume em tanques horizontais cilíndricos e esféricos.

A medição, realizada pelo transdutor, ocorre em frequência igual a 500 kHz, abrangendo uma faixa de capacitância de 25 pF a 4000 pF, considerando uma temperatura ambiente de 20°C . Para essa condição, a fabricante garante reprodutibilidade máxima de $\pm 0,1\%$, e linearidade máxima de $\pm 0,5\%$.

Por fim, devido sua construção, o transdutor pode ser facilmente instalado em tanques de armazenamento através de flanges ou rosqueamento. Destaca-se que não é necessário que seja realizada a calibração do equipamento.

Outro transdutor de nível do tipo capacitivo disponível no mercado é o *VEGACAL 62*, da fabricante VEGA. O transdutor pode ser visualizado na Figura 8. Esse equipamento pode ser utilizado em processos com líquidos não condutores, como óleo, e sólidos a granel.

Figura 8 – VEGACAL 62



Fonte: (VEGA,2023)

Com relação às aplicações, o fabricante garante que o equipamento pode ser utilizado em processos que operam dentro das seguintes condições:

- pressão: -1 bar a 64 bar;
- nível: 0 m a 6 m;
- temperatura do processo: -50°C a 200°C

No equipamento, a alteração da capacitância medida é convertida eletronicamente em um sinal proporcional ao nível. Sua configuração ocorre através de um software próprio do transdutor (via computador), de um aplicativo em smartphones ou da própria interface do transdutor. O fabricante garante:

1. alta flexibilidade devido à sonda de medição encurtável;
2. longa vida útil e baixa necessidade de manutenção;
3. medição em todo o comprimento da sonda;
4. fácil instalação em tanques de armazenamento através de flanges ou superfícies rosqueáveis.

Por fim, em cenários nos quais não é necessária a medição contínua de nível, pode-se empregar no processo chaves de nível capacitivas. Alguns exemplos de aplicação podem ser listados. Dentre eles:

- 1.alarme de nível alto/baixo;
- 2.detecção de vazamentos;
- 3.alarme de transbordamento;
- 4.detecção de nível.

Um exemplo de chave de nível capacitiva é o *SC750*, da fabricante Sitron. O sensor pode ser visualizado na Figura9. O funcionamento ocorre de maneira simples. A ponta da sonda é equipada com um oscilador de alta frequência (5 MHz). Quando a sonda entra em contato com o produto, a frequência de oscilação atinge o ponto pré-definido, o que leva a saída a nível lógico alto.

O sensor pode ser empregado para detecção do nível de óleo, água, produtos corrosivos, sólidos, pó, grãos, líquidos condutivos e não condutivos. Ainda, pode operar com pressão máxima de 10 bar, com temperaturas da faixa de -10°C a 80°C .

Figura 9 – *SC750*



Fonte: (SITRON,2023)

4 Desenvolvimento

Neste capítulo é apresentado o projeto do circuito eletrônico que permite a automação do processo de medição, além dos resultados obtidos. Como já mencionado, não existe a possibilidade de a medição ser realizada nos momentos em que o compressor está ligado, já que além de influenciar na medição, uma tensão demasiadamente alta de alimentação aplicada entre as pontas de prova do sistema de aquisição pode provocar a queima desse dispositivo.

Com o intuito de realizar o chaveamento entre medição e acionamento do compressor podem ser utilizados relés de contatos normalmente aberto (NO) e normalmente fechado (NF). De fato, inicialmente avaliou-se o uso de apenas 6 relés para realizar o chaveamento. Entretanto, a medida que a ideia amadureceu, constatou-se a necessidade de prever camadas de proteção extra ao circuito, visando proteger a integridade do sistema de medição.

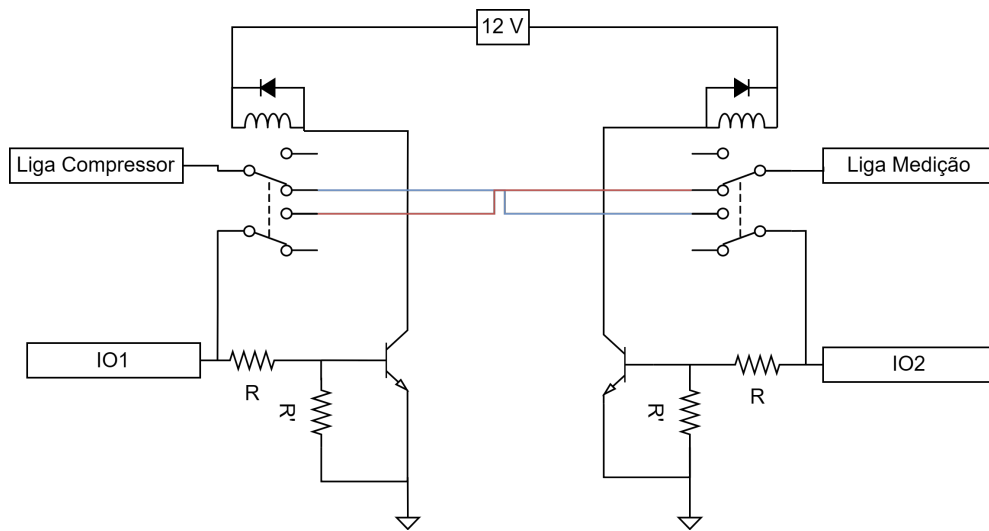
4.1 Camadas de proteção do circuito

As camadas de proteção previstas no projeto possuem dois focos principais. O primeiro é impedir que os sinais de acionamento, oriundos de um sistema de aquisição de dados utilizado para essa finalidade, da medição de capacitância e da ativação do compressor sejam enviados no mesmo instante ao hardware de chaveamento. Apesar de essa operação ser bloqueada no projeto do software do sistema, é possível que alguma interferência externa ou, até mesmo, uma falha do sistema de aquisição de dados, gere esse evento, o que seria fatal para o sistema de medição. Já o segundo foco visa impedir que a medição seja ativada num momento onde, mesmo após a desconexão do compressor do circuito de alimentação, ainda há tensão potencialmente fatal ao sistema de medição nas bobinas do compressor.

Ainda, ao longo do desenvolvimento do hardware, julgou-se necessário adicionar um circuito cuja função é permitir que a tensão de 220 V, oriunda da rede elétrica, seja disponibilizada ao sistema de partida e protetor térmico. Dessa forma, se algo inesperado acontecer durante a operação do sistema, a alimentação é cortada.

Para evitar que os sinais de acionamento do compressor e de permissão do início da medição sejam enviados simultaneamente, pensou-se num circuito de proteção que emprega o uso de dois relés de duplo contato NO e NF. Sendo IO1 o sinal de acionamento da medição e IO2 o sinal de acionamento do compressor, construiu-se o circuito ilustrado na Figura10.

Figura 10 – Camada de proteção para situações em que IO1 e IO2 estejam em nível lógico alto simultaneamente



Fonte: Arquivo Pessoal

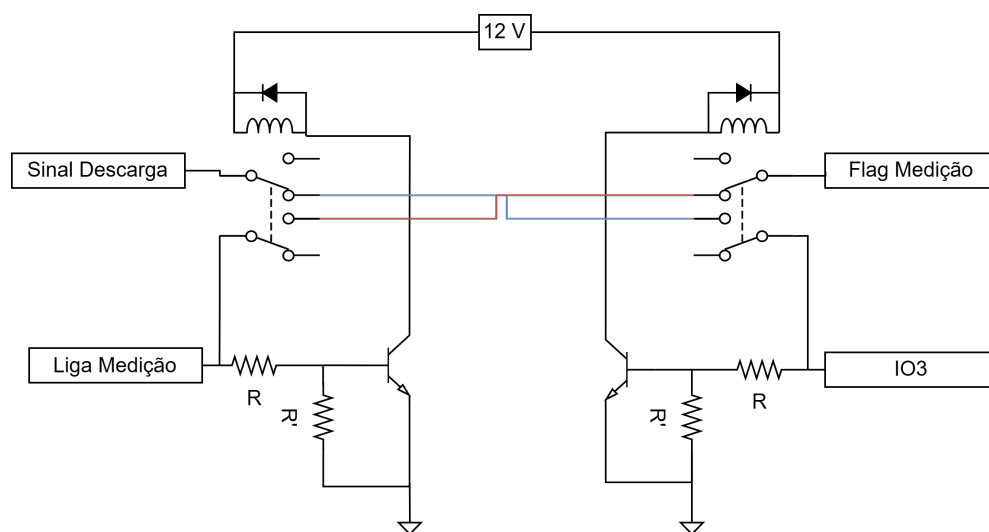
O funcionamento é bastante intuitivo. Nesse circuito, IO1 e IO2 possuem um papel intermediário nos respectivos acionamentos, que são habilitados pelos sinais Liga Medição e Liga Compressor. Quando IO1 se encontra em nível lógico alto, o sinal Liga Compressor é conectado, via chaveamento do relé, à porta NO que, por sua vez, é conectada à nada. O mesmo ocorre com o sinal Liga Medição quando IO2 está em nível lógico alto. A Tabela1 ilustra a tabela verdade desse trecho do projeto.

Tabela 1 – Tabela verdade do circuito da Figura10

IO1	IO2	Liga Compressor	Liga Medição
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	0

Como já mencionado, o circuito não deve permitir que a medição de capacitância seja acionada num momento em que haja demasiado valor de tensão das bobinas do motor. Assim, previu-se, em projeto, uma etapa de pré-descarga dos enrolamentos sobre resistores de potência. O sinal responsável pelo envio do comando de início dessa operação é denominado IO3. Assim como no caso anterior, a operação simultânea entre IO1 e IO3 deve ser bloqueada via hardware. Para isso, foi desenvolvido um circuito, cuja representação pode ser visualizada na Figura11. As funções dos sinais Sinal Descarga e Flag Medição são detalhadas nesta seção. O funcionamento do circuito pode ser explicado pela Tabela1, alterando o sinal IO2 por IO3.

Figura 11 – Camada de proteção para situações em que IO1 e IO3 estejam em nível lógico alto simultaneamente



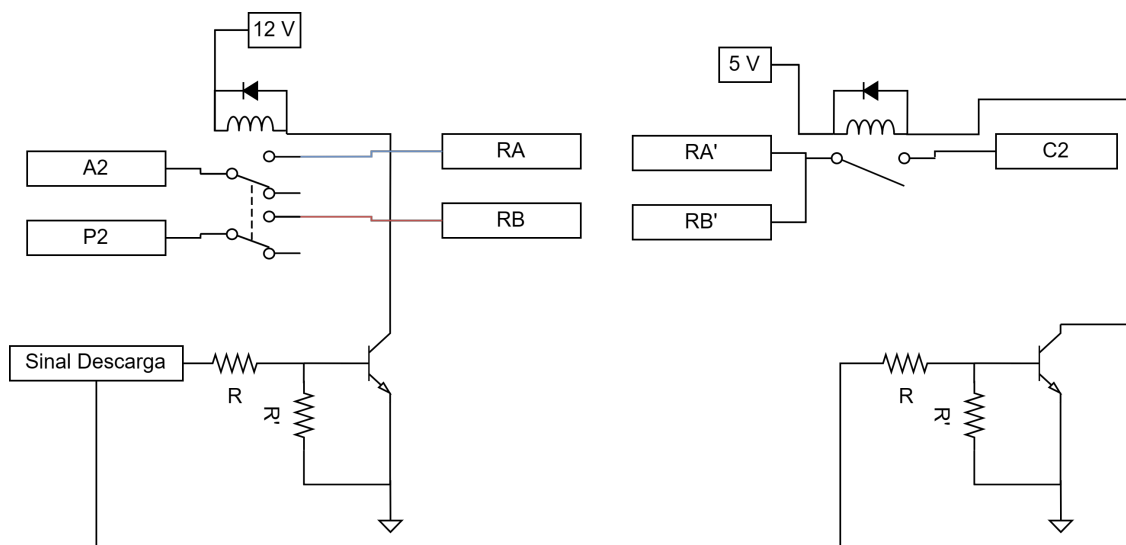
Fonte: Arquivo Pessoal

O circuito de descarga consiste na inserção dos resistores de potência nos terminais da bobina auxiliar, bobina principal e comum do compressor. Assim, quando Sinal Descarga está em nível lógico alto, ocorre o acoplamento. O circuito desenvolvido para essa finalidade pode ser verificado na Figura12, na qual RA e RA' correspondem aos terminais do primeiro resistor que deve ser acoplado à bobina auxiliar, RB e RB' aos terminais do segundo resistor que deve ser acoplado à bobina principal e A2, P2 e C2 aos terminais do lado do compressor, ou seja, excluindo a conexão do circuito de alimentação oriundo da rede. No projeto desse trecho, utilizam-se dois relés diferentes. As razões para essa escolha são detalhadas na Seção4.3.

Após a descarga dos enrolamentos do motor do compressor, torna-se necessário verificar se há tensão residual potencialmente perigosa para o sistema de medição. Entretanto, como o compressor opera com a tensão nominal da rede, para a verificação ser realizada, é necessário reduzir o valor de tensão para uma faixa apropriada para circuitos eletrônicos. Logo, no momento em que Sinal Descarga estiver em nível lógico alto, dois transformadores são conectados junto as bobinas, numa proporção de redução de 220/15 V/V. O diagrama que representa esse trecho do circuito pode ser visualizado na Figura13.

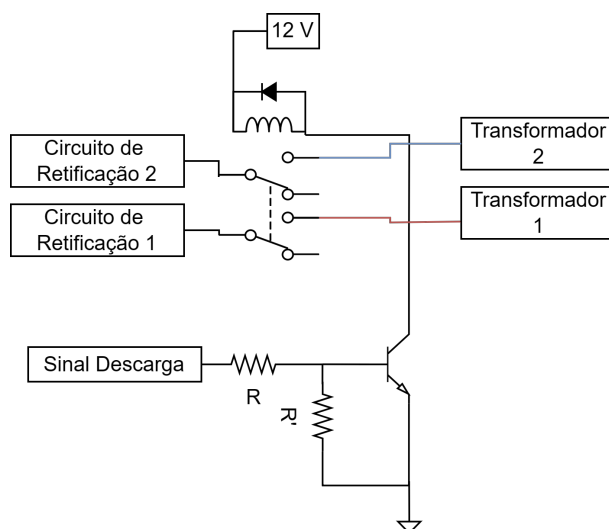
Após o acoplamento dos transformadores ao hardware do sistema, o sinal resultante passa por um circuito retificador de precisão, já que se trata de uma onda senoidal. O objetivo principal do circuito retificador é, como o próprio nome sugere, retificar o sinal oriundo dos transformadores, de modo que se torne possível a comparação com um valor seguro de tensão para acionamento da medição de capacitância. É interessante notar que não é possível utilizar um circuito retificador comum nessa tarefa, uma vez que sua

Figura 12 – Camada de proteção de descarga dos enrolamentos do compressor



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 13 – Inserção dos transformadores para verificação de nível seguro de tensão

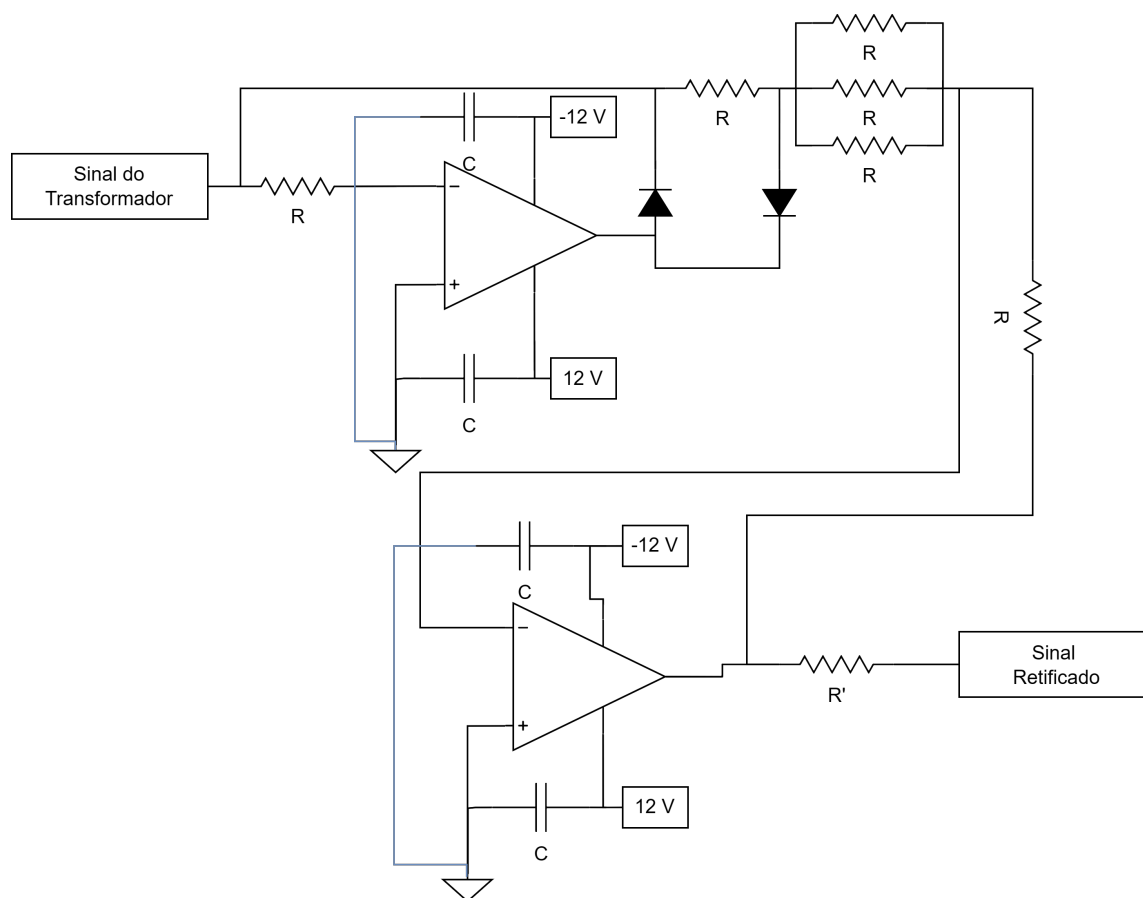


Fonte: Arquivo Pessoal

construção se dá através do uso de diodos que, tipicamente, provocam uma queda de tensão de 0,7 V no circuito (esse valor pode variar de acordo com o componente utilizado), o que representa 10,26 V do sinal original. O diagrama correspondente ao circuito de retificação pode ser visualizado na Figura 14.

Antes de ser enviado ao circuito comparador de tensão LM339N, o sinal retificado passa por mais uma camada de segurança, cuja função é atrasá-lo. Tal camada foi projetada com o intuito de ser mais uma barreira que impede com que a medição de capacitância

Figura 14 – Circuito de retificação de precisão



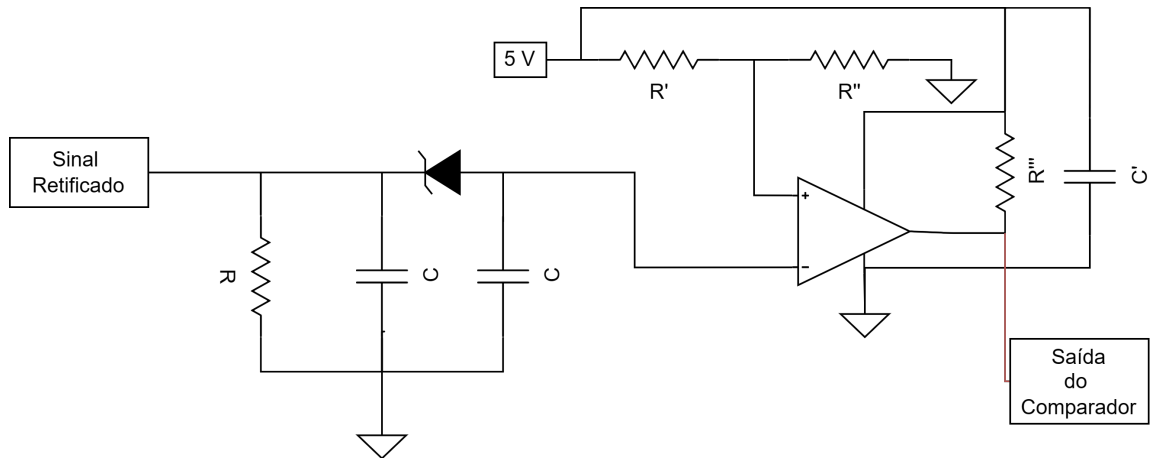
Fonte: Arquivo Pessoal

seja ativada num momento em que há tensão alta sobre os enrolamentos. O diagrama do circuito correspondente pode ser visualizado na Figura15. Nele, há a comparação entre o sinal do divisor de tensão com o sinal atrasado (V^+) oriundo do circuito de retificação (V^-). Se $V^+ > V^-$, o circuito integrado (CI) comparador entrega 5 V na saída. Caso contrário, a saída permanece em nível lógico baixo.

Embora o LM339N seja representado no diagrama por apenas um amplificador operacional, o CI possui 4 saídas. Dentre elas, 2 são utilizadas para comparação dos sinais retificados oriundos das bobinas principal e auxiliar. A medição pode ser habilitada no momento em que as duas saídas do comparador estiverem em nível lógico alto. Para isso, montou-se uma lógica *AND* com o emprego de dois relés de um contato em série que, quando acionados, fazem com que o sinal Flag Medição habilite a alimentação dos relés que chaveiam a medição de capacitância. A Figura16ilustra o diagrama do circuito.

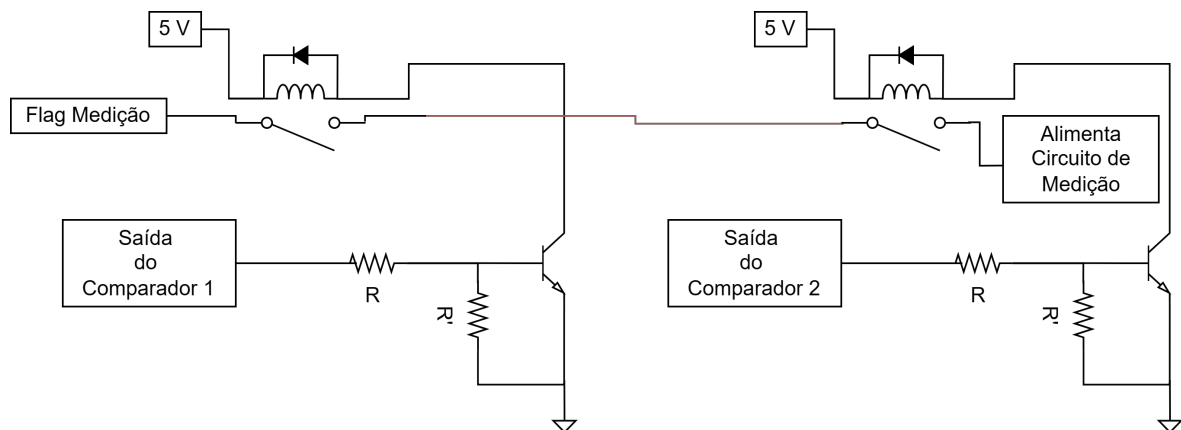
Por fim, projetou-se uma outra camada com a função de conectar o protetor térmico do compressor ao fio fase oriundo da rede de alimentação. O acionamento dessa camada ocorre através do sinal Liga Alimentação Rede, como pode ser visualizado na Figura17.

Figura 15 – Circuito de atraso e comparação de sinal



Fonte: Arquivo Pessoal

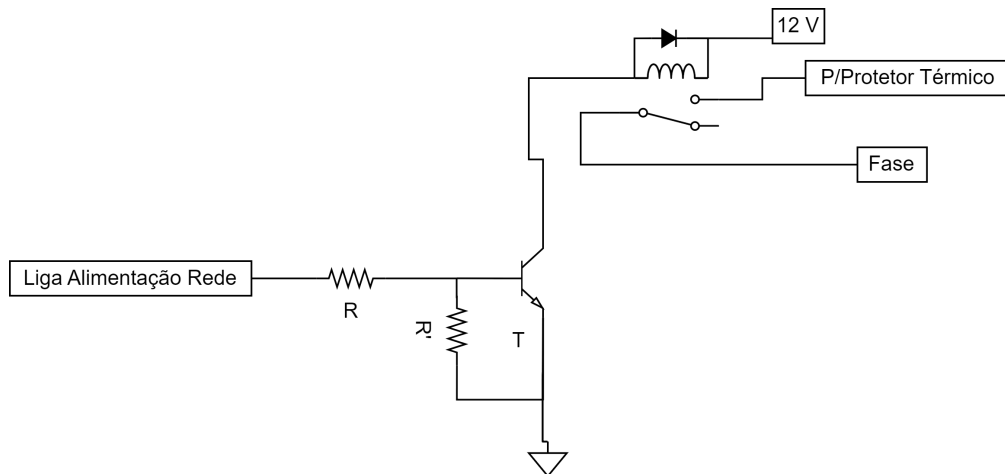
Figura 16 – Habilitação da alimentação do circuito de chaveamento da medição de capacitância



Fonte: Arquivo Pessoal

Caso o sinal em questão esteja em nível lógico baixo, mesmo que seja enviado o comando para acionar o compressor, nada acontecerá.

Figura 17 – Conexão do fio fase ao protetor térmico do compressor



Fonte: Arquivo Pessoal

4.2 Camada de chaveamento

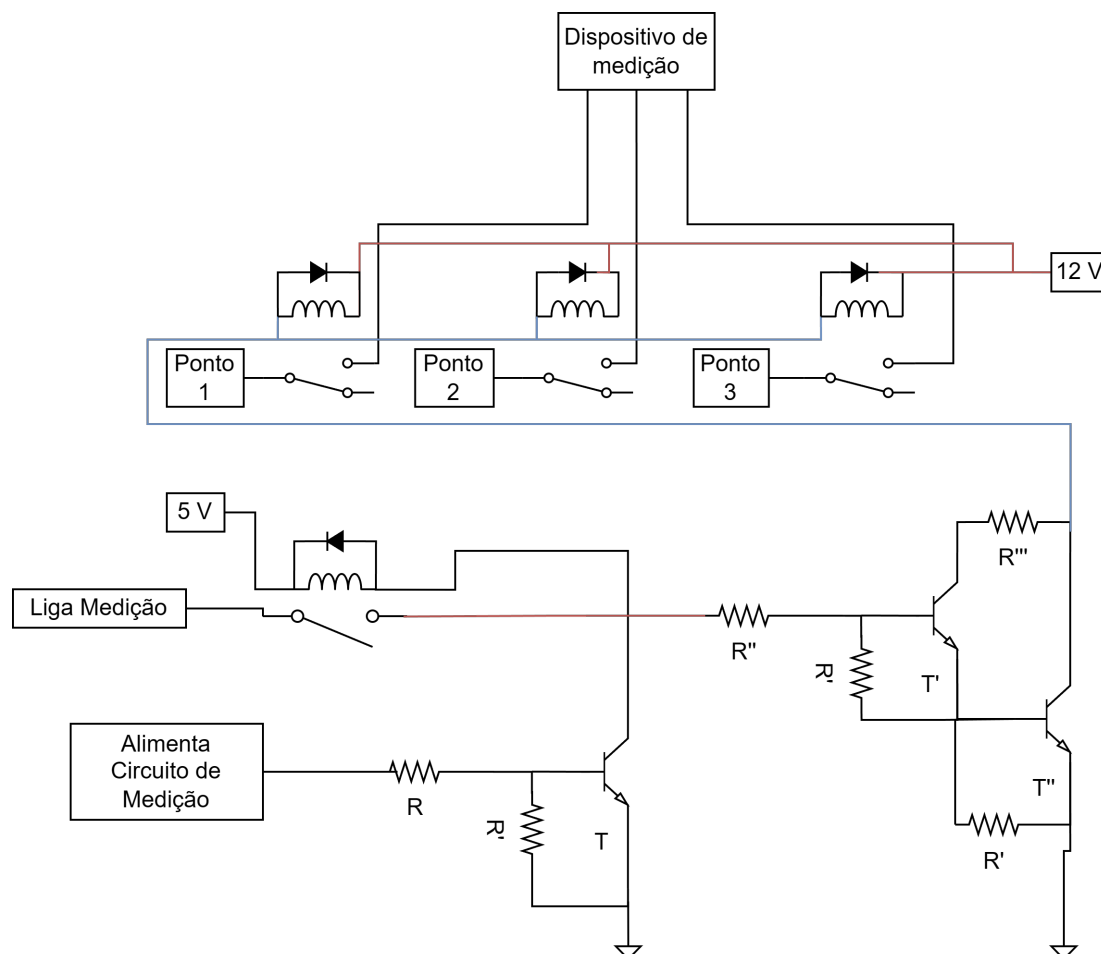
Após o projeto das camadas de proteção do circuito, pôde-se desenvolver a camada de chaveamento que, como mencionado, é composta por 6 relés. O primeiro grupo (composto por 3 relés), possui a função de habilitar e desabilitar a medição de capacitância. Para isso, utilizam-se as portas NO dos relés AX1RC2. A trilha resultante é conectada aos do medidor de capacitância. O diagrama da Figura 18 ilustra o circuito desenvolvido.

Para realizar o acionamento do compressor, foi desenvolvido o circuito da Figura 19. A ideia principal é, após recebido o sinal Liga Compressor, conectar os terminais de alimentação aos terminais do compressor.

4.3 Dimensionamento do circuito

O dimensionamento dos componentes do circuito foi feito de acordo com as exigências dos acionamentos. Para o acionamento da medição de capacitância e do compressor, foram utilizados relés de modelo AX1RC2. Tal componente possui capacidade máxima de corrente de comutação de 15 A (num cenário de alimentação de 12 V), quando o compressor é operado com uma tensão de 120 V, o que corresponde às especificações dos compressores utilizados nos ensaios. Além disso, nenhum dos modelos utilizados possui especificação de corrente máxima nas bobinas acima de 8 A, o que garante a viabilidade do uso desse tipo de relé.

Figura 18 – Trecho de circuito responsável pelo chaveamento da medição de capacitância



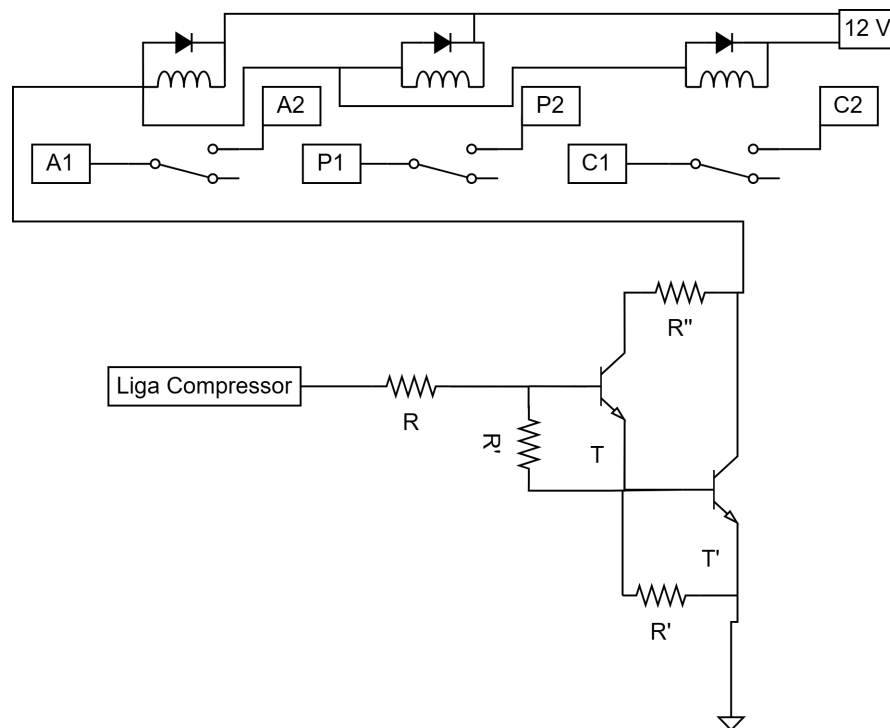
Fonte: Arquivo Pessoal

Os relés de duplo contato utilizados são do modelo ML2RC2. Este modelo possui capacidade máxima de corrente de 2 A no comutador quando operado em circuitos de tensão alternada e 1 A em circuitos de corrente contínua, o que é suficiente para a aplicação.

O último relé utilizado no projeto é o de contato simples, de modelo HE3621A0510, que possui tensão nominal da bobina de 5 V, diferente dos 12 V de alimentação dos outros dois relés. Novamente, a capacidade máxima de corrente suportada no contatos desse componente é de 1,2 A, suficiente para a aplicação.

O acionamento dos relés é feito mediante uso de transistores NPN, já que a placa de aquisição de sinais utilizada para comando do hardware não fornece corrente suficiente para que o acionamento ocorra. Embora a ficha técnica (*datasheet*) dos componentes informe a corrente nominal das bobinas, optou-se pelo sobredimensionamento do projeto, pois a corrente de partida assume valores bem maiores que os nominais, ainda que por um período muito curto de tempo.

Figura 19 – Trecho de circuito responsável pelo chaveamento do acionamento do compressor



Fonte: Arquivo Pessoal

Nos circuitos das figuras 10, 11, 12 e 13, R e R' foram dimensionados de forma que a corrente máxima de acionamento do relé fosse 10 vezes maior que a nominal da bobina. É importante ressaltar que, após o transitório inicial, quando a corrente atinge o valor nominal especificado no *datasheet* do componente, o transistor 2N2222 estará em modo de saturação. Considerando o *datasheet* do transistor, sabe-se que o ganho de corrente h_{FE} , para a faixa de interesse, é de 50, com V_{CE} e V_{BE} de saturação 0,4 V e 1,3 V, respectivamente. Assim, R assume um valor de 29,6 Ω . Como não se trata de um valor nominal de resistor, utiliza-se $R = 22 \Omega$. Já R' se trata de um resistor de *pull-down*, e foi arbitrado em 10 k Ω . Assim, temos que $i_{C_{max}} = 168 \text{ mA}$, bastante inferior ao valor máximo de 800 mA suportado no coletor do componente.

O dimensionamento da camada de chaveamento foi realizado utilizando relés de contato NO e NF. Para isso, optou-se pelo acionamento através de configurações *Darlington*, que permitem aumentar o ganho de corrente e a capacidade de controlar correntes elevadas com baixas correntes de acionamento (DUNN, 2005). Na Figura 18, T' e T'' referem-se aos transistores BC547 e TIP31C, respectivamente. Os relés AX1RC2 possuem corrente nominal nas bobinas de 30 mA. Logo, para o conjunto de 3 relés, é necessário que o acionamento seja dimensionado para permitir a passagem de, pelo menos 90 mA, valor muito próximo do máximo permitido no coletor do componente BC547 (100 mA). Além

disso, como optou-se pelo sobredimensionamento do acionamento, o transistor BC547 não poderia ser utilizado sozinho. Dessa forma, prevendo uma corrente máxima de 1 A, e considerando $h_{FE_{BC547}} = 110$, $h_{FE_{TIP31C}} = 25$, $V_{CE_{BC547}} = 0,15 \text{ V}$, $V_{CE_{TIP31C}} = 0,2 \text{ V}$, $V_{BE_{BC547}} = 0,9 \text{ V}$ e $V_{BE_{TIP31C}} = 0,95 \text{ V}$, temos que $R'' = 10 \text{ k}\Omega$ e $R''' = 220 \Omega$, sendo R''' um resistor que limita a corrente de coletor do transistor BC547. Ainda, R' é um resistor de *pull-down* com valor de $100 \text{ k}\Omega$.

Na Figura18, tem-se ainda o trecho de acionamento do relé de contato único HE3621A0510, no qual T refere-se ao transistor 2N2222. Aqui, para garantir o acionamento do relé, R assume o valor de $1 \text{ k}\Omega$.

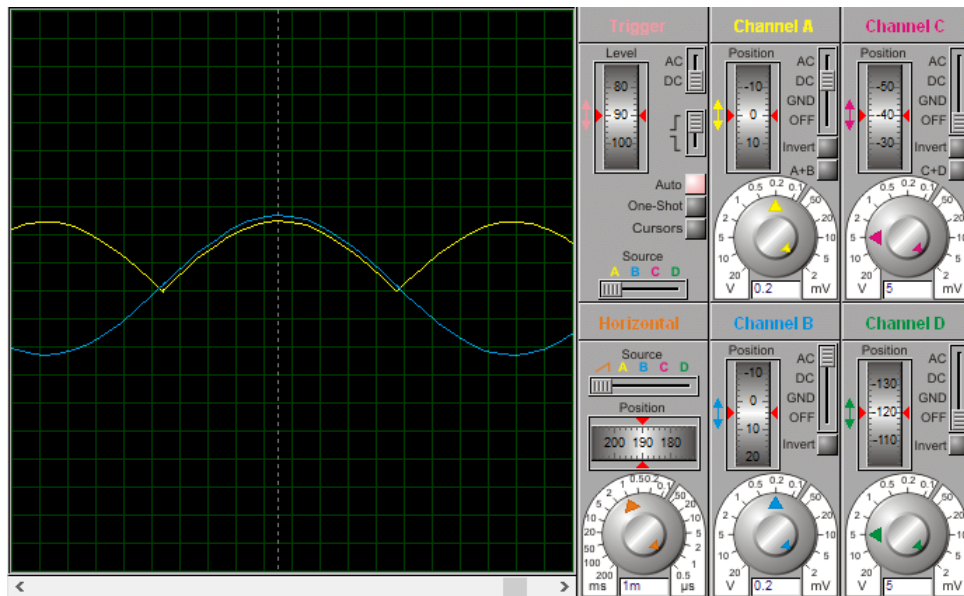
No acionamento representado na Figura19, temos dois transistores, configurados em padrão *Darlington*. Aqui, T refere-se ao BC547 e T' ao TIP31C. Mantendo o mesmo padrão de dimensionamento da Figura18, $R = 10 \text{ k}\Omega$, $R' = 100 \text{ k}\Omega$ e $R'' = 220 \Omega$.

O sinal oriundo dos transformadores empregados no circuito para converter o valor de tensão das bobinas primária e secundária do compressor em um valor com o qual torne-se possível a comparação com um valor de segurança através de um circuito eletrônico de baixa potência passa por um retificador de precisão. O emprego desse tipo de retificador, ao invés de um retificador de ponte construído com diodos, se justifica pela queda de tensão observada na saída do circuito. Como discutido, a queda de tensão em um único diodo corresponde à $10,26 \text{ V}$ do sinal original, valor que tem potencial para influenciar significativamente a medição. Como alternativa, montou-se o circuito da figura 14, composto por um amplificador inversor ligado a um somador, ambos de modelo TL071, no qual R assume um valor de $10 \text{ k}\Omega$. No diagrama, $R' = 1 \text{ k}\Omega$, e é necessário para a sequência do circuito de comparação.

Para ilustrar a eficiência desse tipo de retificador em sinais de baixa amplitude, através da utilização de um software de simulação, simulou-se um cenário de retificação de um sinal senoidal de amplitude $0,5 \text{ V}$, valor menor que a queda de tensão mínima tipicamente observada em diodos. A Figura20 ilustra os resultados observados, na qual o canal A corresponde ao sinal retificado, e o canal B ao sinal original.

Ainda, tem-se o dimensionamento do trecho de circuito responsável pelo atraso do sinal retificado, que pode ser visualizado na Figura15. Embora a constante de tempo de descarga das bobinas seja baixa (aproximadamente 18 ms), o circuito foi projetado para que haja um atraso na percepção de que o sinal de tensão oriundo das bobinas encontra-se numa faixa inferior a um valor seguro. A configuração adotada faz com que o sinal de tensão no capacitor conectado à porta inversora do CI LM339N possua uma defasagem em relação ao sinal original, devido a presença do diodo zener no circuito. O dimensionamento foi realizado empiricamente, através de um software de simulação. No caso, com uma configuração em que $C = 100 \mu\text{F}$ e $V_z = 2,4 \text{ V}$, sendo V_z a tensão zener, o CI habilita a saída em nível lógico alto após 7 segundos , tempo no qual a tensão observada na porta

Figura 20 – Sinal senoidal de 0,5 V de amplitude retificado



Fonte: Arquivo Pessoal

inversora é menor que a tensão no divisor de tensão (aproximadamente 0,9 V, para $R' = 1 \text{ k}\Omega$ e $R'' = 220 \Omega$). É interessante notar a presença de um resistor R''' entre a alimentação e a saída do CI. Tal configuração é recomendada pelo próprio fabricante do componente. Caso não haja a presença desse resistor, a tensão de saída do CI fica limitada a um valor abaixo dos 5 V esperados quando encontra-se em nível lógico alto, o que foi constatado quando testou-se o componente na etapa de projeto.

Por fim, destaca-se a presença de diodos de roda livre em paralelo com as bobinas de todos os relés utilizados para a realização dos acionamentos. A presença desses componentes é importante pois, por se tratar de uma carga indutiva, a tensão na bobina do relé pode ser expressa como

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.1)$$

sendo L e i_L a indutância e a corrente na bobina, respectivamente. Como trabalha-se com um acionamento chaveado, no momento em que o nível lógico for de 1 para 0, surgirá um pico de tensão reversa (teoricamente infinito), devido ao termo derivativo da equação (4.1) na entrada do coletor do transistor, o que pode danificá-lo. A presença do diodo de roda livre evita o surto de tensão, colocando em curto a corrente induzida no corte.

4.4 Projeto da placa de circuito impresso

Devido à complexidade do projeto, julgou-se necessário o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*) para implementação do circuito. Essa opção traz algumas vantagens, se comparada com o uso de uma placa perfurada universal. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de dimensionamento da largura das trilhas individualmente, de acordo com a necessidade do projeto, já que algumas trilhas do circuito, como as de alimentação do compressor, necessitam de maior largura, quando comparadas às trilhas de sinais, por exemplo, devido à corrente de maior magnitude que as percorre.

Para isso, utilizou-se o software Altium Designer, que além de possibilitar a criação do layout da PCB, permite a criação do diagrama elétrico do circuito, através da importação de bibliotecas que implementam os componentes utilizados no projeto. A escolha pelo software justifica-se pela compatibilidade de compartilhamento dos resultados de desenvolvimento com a instituição que produziu a placa, já que este é o software utilizado em projetos realizados no local. Portanto, a compatibilidade dos arquivos tornou-se fundamental para o bom andamento do projeto.

Um dos requisitos críticos de confecção da placa é a dimensão máxima admitida pela fresadora. No caso, há um limite de 23 cm na largura e na altura da placa. Tal limitação implica no desenvolvimento de um projeto que utiliza 2 camadas de cobre, com o intuito de comportar a grande quantidade de componentes, sendo 51 resistores, 23 diodos, 13 capacitores, 5 CIs, 15 transistores NPN, 20 relés e 2 conectores BNC.

Embora a opção por utilizar duas camadas de cobre na confecção de PCB tenha ajudado a comportar todos os componentes do projeto na placa, o número de ligações (ou trilhas) ainda era alto, o que dificultou o desenvolvimento do *layout*. Para isso, previu-se a criação de duas malhas de terra, uma em cada camada, de forma a eliminar as trilhas necessárias para aterramento dos componentes. Com a utilização desse recurso, a placa passou a ter 291 trilhas de conexão.

As trilhas de sinal foram dimensionadas com largura de 40 mils (o equivalente a 1 mm), o que é suficiente para sinais de baixa corrente, já que as chapas possuem espessura de cobre de 1 oz. Já as trilhas utilizadas para alimentação do compressor foram dimensionadas como segue. A área necessária de seção transversal do condutor pode ser calculada por (IPC...,2012):

$$A = \left(\frac{I}{k\Delta T^{0,44}} \right)^{\frac{1}{0,725}} \quad (4.2)$$

sendo I a corrente que percorre a trilha, ΔT o aumento de temperatura máximo em °C e k uma constante que depende da localização da trilha, com $k = 0,048$ para camadas

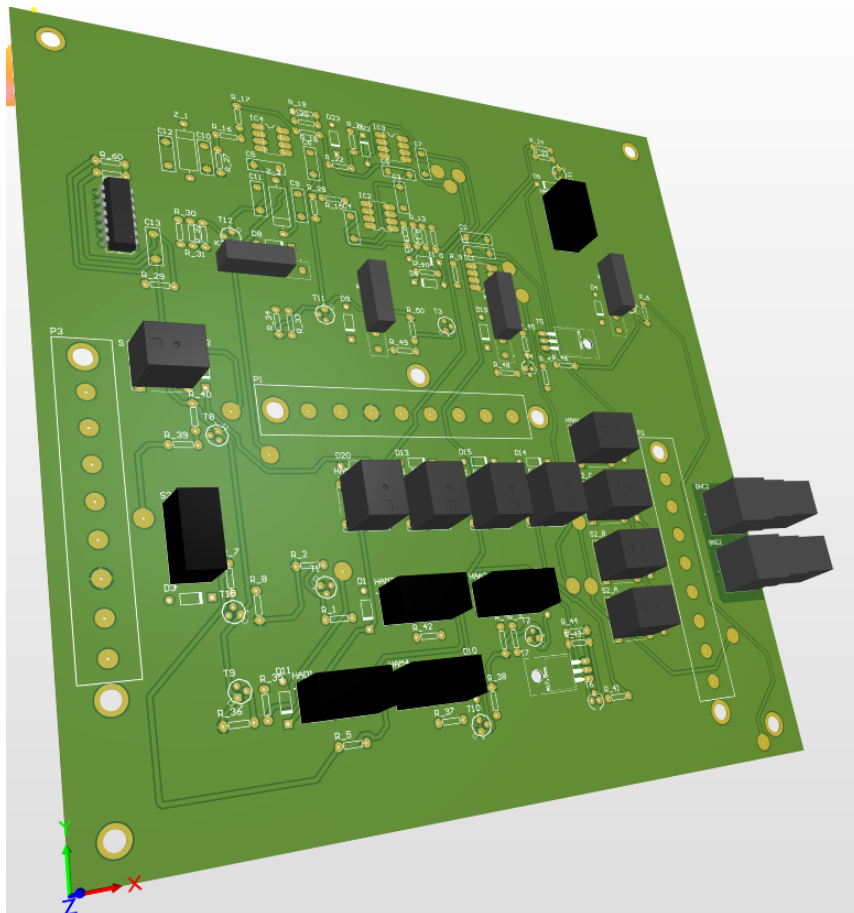
externas. Finalmente, a largura da trilha pode ser calculada como:

$$L = \frac{A}{1,378E} \quad (4.3)$$

sendo E a espessura do cobre. Considerando uma corrente máxima prevista para 8 A e um aumento de temperatura de 25 °C, no projeto, utilizou-se uma largura para as trilhas de maior corrente de 118 mils (o equivalente a 3 mm).

Por fim, devido à grande quantidade de trilhas presentes no projeto, utilizou-se um recurso de roteamento automático para realizar as conexões, inserindo no software algumas regras de confecção e corrigindo algumas trilhas posteriormente. Uma representação 3D da placa pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 – Visualização 3D da PCB no Altium Designer

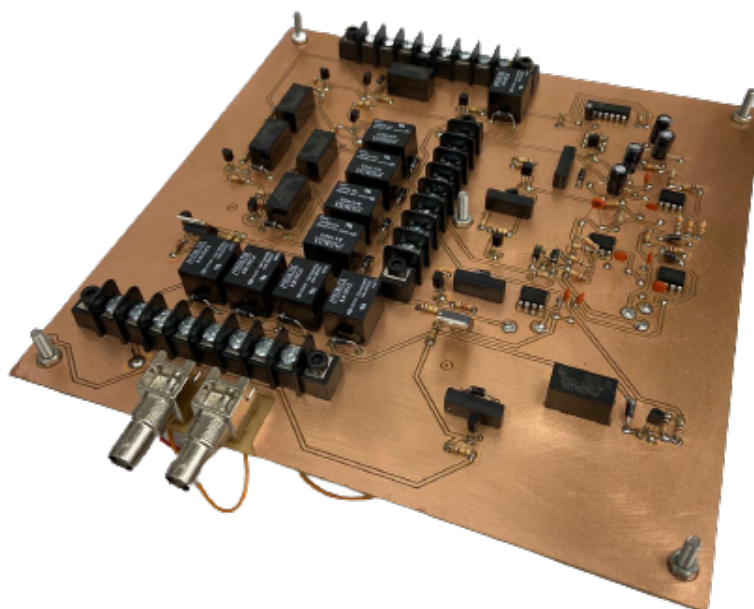


Fonte: Arquivo Pessoal

A confecção da placa pela fresadora durou cerca de 8 horas, e a soldagem dos componentes cerca de 2 semanas. Durante o processo de soldagem, devido o dimensionamento de alguns *pads* e trilhas, alguns segmentos de cobre foram danificados, o que tornou

necessária a inserção de alguns *jumpers* na placa. O resultado final da confecção pode ser visualizado na Figura22.

Figura 22 – PCB desenvolvida no projeto



Fonte: Arquivo Pessoal

5 Análise crítica e conclusões

O trabalho apresentado neste documento trouxe-se avanços importantes para a medição de nível de óleo em compressores herméticos. Inicialmente, a Nidec GA adotava dois métodos. O primeiro, se dá mediante o uso de uma balança para relacionar o peso do compressor com a quantidade de óleo. O segundo, consiste na inserção de um visor graduado na lateral da carcaça. Atualmente, o método proposto desenvolvido pode ser utilizado de forma suplementar aos já adotados, com erro máximo de 2 mL quando utiliza-se o modelo que relaciona capacitância e nível de óleo específico do compressor.

O projeto do circuito eletrônico de chaveamento é complexo. Inicialmente, previu-se a utilização de apenas 6 relés para realização das tarefas, juntamente com seus circuitos de acionamento. Entretanto, À medida que o projeto avançou, constatou-se a necessidade do acréscimo de camadas de segurança, visando proteger o dispositivo de medição, o que adicionou um grau mais elevado de complexidade ao projeto. Embora os resultados de medição através da utilização da placa não tenham sido apresentados neste trabalho, pelo fato de o desenvolvimento ter sido realizado sob supervisão de pessoal especializado, considera-se que o projeto foi bem executado, podendo ser colocado em funcionamento em breve.

Conclui-se que o projeto *Medição não invasiva de volume de óleo em compressores de refrigeração* trouxe avanços importantes para o desenvolvimento de um novo método de medição de volume de óleo.

Referências

- ATTIVISSIMO, F. et al. First experimental tests on the prototype of a capacitive oil level sensor for aeronautical applications. *Akta IMEKO*, v. 12, 2023. Citado na página10.
- BEGA, E. et al. *Instrumentação Industrial*. [S.l.]: Editora Interciência, 2006. Citado 4 vezes nas páginas18,20,21e22.
- BERA, S. C. et al. Study of a modified capacitance-type level transducer for any type of liquid. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 63, n. 3, p. 641–649, 2014. Citado na página11.
- BLOCH, H.; HOEFNER, J. *Reciprocating Compressors*. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 1996. Citado na página14.
- CHETPATTANANONDH, K. et al. A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 209, p. 175–182, 2014. ISSN 0924-4247. Citado na página11.
- DUNN, W. *Fundamentals of Industrial Instrumentation And Process Control*. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005. Citado na página35.
- DUPUIS, E.; HWANG, G. Custody transfer: Flowmeter as cash register. *Control Engineering -Highlands Ranch- Cahners then Reed Business Information-*, v. 57, p. 28–32, 11 2010. Citado na página10.
- ENDRESS+HAUSER. *Capacitance Level measurement Liquicap FMI51 For continuous level and interface measurement in liquids*. 2023. Url <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/Capacitance-level-Liquicap-FMI51?t.tabId=product-overview>. Citado na página24.
- FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications (Handbook of Modern Sensors)*. [S.l.]: SpringerVerlag, 2003. ISBN 0387007504. Citado na página10.
- GONG, C.-S. A. et al. Low-cost comb-electrode capacitive sensing device for liquid-level measurement. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 9, p. 2896–2897, 2016. Citado na página 10.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics, volume 3 (chapters 21 - 32)*. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 11e22.
- HAMANAKA, M. E.; SEGUNDO, A. K. R.; SILVA, S. A. Lopes da. Portable non-invasive capacitive transducer for measuring fuel level. In: *2017 IEEE SENSORS*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–3. Citado na página11.
- HENRY, G. *Basics of Continuous Level Measurements*. [S.l.]: Endress+Hauser, 2015. Citado 4 vezes nas páginas17,18,19e20.
- HUNDY G.; TROTT, A. W. T. *Refrigeration and Air-Conditioning*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0-7506-8519-1. Citado na página13.

- IMKO. *Overview Capacitance Liquicap liquids*. 2023. Url: https://www.imko.de/de/overview_capacitance_liquicap_liquids/. Acesso em 22 de junho de 2023. Citado na página21.
- IPC - Generic Standard on Printed Board Design. Bannockburn, IL, 2012. Citado na página38.
- LOIZOU, K.; KOUTROULIS, E. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. *Measurement*, v. 89, p. 204–214, 2016. ISSN 0263-2241. Citado 2 vezes nas páginas10e11.
- MATOS, R. *Refrigeração*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Citado 2 vezes nas páginas13e14.
- MORRIS, A. *Measurement and Instrumentation Principles*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2001. Citado na página23.
- PRATA, A. T.; JR., J. R. B. Role of the thermodynamics, heat transfer, and fluid mechanics of lubricant oil in hermetic reciprocating compressors. *Heat Transfer Engineering*, Taylor Francis, v. 30, n. 7, p. 533–548, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01457630802594796>. Citado na página14.
- REVERTER, F.; LI, X.; MEIJER, G. C. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 138, n. 1, p. 1–8, 2007. Citado na página11.
- SALMAZ, U.; AHSAN, M. A. H.; ISLAM, T. High-precision capacitive sensors for intravenous fluid monitoring in hospitals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–9, 2021. Citado na página10.
- SEDREZ, P. *Caracterização experimental de propriedades dielétricas de misturas óleo-refrigerante*. 100 f. Monografia (Dissertação (mestrado)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2014. Citado na página13.
- SINGH, H. K. et al. A new non-intrusive optical technique to measure transparent liquid level and volume. *IEEE Sensors Journal*, v. 11, n. 2, p. 391–398, 2011. Citado na página 10.
- SINGH, Y.; RAGHUWANSHI, S. K.; KUMAR, S. Review on liquid-level measurement and level transmitter using conventional and optical techniques. *IETE Technical Review*, Taylor Francis, v. 36, n. 4, p. 329–340, 2019. Citado na página10.
- SITRON. *Chaves de Nível Capacitivas - Séries: SC750/ SC250/ SC400*. 2023. Url <https://www.sitron.com/pt/produtos/nivel/chave-de-nivel/capacitiva/>. Acesso em 22 de junho de 2023. Citado na página26.
- STOECKER W.; JONES, J. *Refrigeração e Ar Condicionado*. São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda, 1985. Citado na página13.
- TOPRAK, S.; IFTAR, A. Fault diagnosis on hermetic compressors based on sound measurements. In: *2007 IEEE International Conference on Control Applications*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 783–788. Citado na página13.

VEGA. *VEGACAL 62: Sonda de haste capacitiva para medição contínua de nível*. 2023. Url <https://www.vega.com/pt-br/produtos/catalogo-de-produtos/nivel-contínuo/capacitivo/vegacal-62>. Acesso em 22 de junho de 2023. Citado na página 25.