

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
ENGENHARIA MECATRÔNICA

CLAUDIO RAMOS SCHMITZ

OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETROELETRÔNICOS DO
PROJETO T3 - LABMETRO/UFSC

FLORIANÓPOLIS, 04 DE JUNHO DE 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
ENGENHARIA MECATRÔNICA

CLAUDIO RAMOS SCHMITZ

OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETROELETRÔNICOS DO
PROJETO T3 - LABMETRO/UFSC

Trabalho de conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Mecatrônico.

Professor Orientador: Jean Paulo
Rodrigues, Dr. Eng.
Coorientador: Matias Roberto Viotti, Dr.
Ing.

FLORIANÓPOLIS, 04 DE JULHO DE 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Schmitz, Claudio Ramos

Otimização dos circuitos eletroeletrônicos do Projeto
T3 - LABMETRO/UFSC / Claudio Ramos Schmitz ; orientação
de Jean Paulo Rodrigues; coorientação de Matias Roberto
Viotti. - Florianópolis, SC, 2018.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Tensões residuais. 2. Método do furo cego. 3.
Metrologia óptica. 4. Circuitos eletroeletrônicos robustos.
5. Modulação PWM. I. Rodrigues, Jean Paulo. II. Viotti,
Matias Roberto. III. Instituto Federal de Santa
Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
IV. Título.

OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETROELETRÔNICOS DO PROJETO T3 - LABMETRO/UFSC

CLAUDIO RAMOS SCHMITZ

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Mecatrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de Julho de 2018.

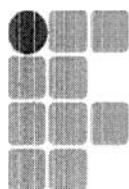
Banca Examinadora:

Jean Paulo Rodrigues, Dr. Eng.

Matias Roberto Viotti, Dr. Ing.

Adriano Regis, Dr. Eng.

Valdir Noll, Dr. Eng.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **CLAUDIO RAMOS SCHMITZ**, matrícula n° **142004794-9**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS ELETROELETRÔNICOS DO PROJETO T3 - LABMETRO/UFSC**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 04 de Julho de 2018.

Jean Paulo Rodrigues

Prof. Orientador do TCC: Jean Paulo Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, aos meus pais Nilson e Maria de Fátima pelo amor, carinho e apoio em todas as etapas da minha vida.

Agradeço também aos professores pelos conhecimentos transmitidos e indispensáveis a realização deste trabalho, em especial aos meus orientadores Prof. Jean Paulo Rodrigues e Matias Roberto Viotti, pela oportunidade e orientação.

À equipe de trabalho composta pela equipe de pesquisadores do Projeto T3, pelas discussões, incentivo, aprendizado e amizade. De um modo geral a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

À minha companheira Maria Cristina Sampaio pela paciência, apoio e incentivo ao longo de mais essa caminhada.

Aos amigos conquistados Andrei Alves, Renato Machado de Souza e tantos outros, pelos momentos de descontração e divertimento proporcionados.

Finalmente, agradeço ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina pela oportunidade, ao Laboratório de Metrologia e Automação - LABMETRO pela excelente estrutura fornecida e a PETROBRAS/CENPES que financiou esse trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento de equipamentos especiais para aplicação na indústria de petróleo e gás é crescente. Neste contexto se insere o projeto “**T**écnicas especiais para medição de tensões residuais com foco na indústria do petróleo e gás – Projeto T3.” O mesmo visa desenvolver equipamentos e procedimentos a serem utilizados em campo para medir tensões residuais assim como as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos dutos de transporte de petróleo e derivados.

O projeto T3 é fruto de um projeto anterior denominado CARD3 com foco também em medição de tensões residuais. Como resultado, espera-se aperfeiçoar o sistema óptico de medição de tensões residuais pelo método do furo permitindo sua aplicação para medições em campo. A incorporação de melhorias em hardware e software visam ainda aumentar a capacidade de furação do sistema de medição permitindo a avaliação de materiais com alta dureza assim como com alta ductilidade.

Este projeto de TCC se insere dentro das melhorias de hardware. Consequentemente um conjunto de circuitos eletroeletrônicos herdados do projeto CARD3 foram substituídos e/ou tornados mais robustos. Entre os circuitos que sofreram alterações, está o circuito de modulação PWM com duty cycle de 0 a 100%, comandado por um sinal analógico. Adicionalmente, outros circuitos foram incorporados devido às novas funções do sistema de medição. Estes novos circuitos estão relacionados principalmente com a integração do novo sistema de furação que é composto por um motor elétrico. Uma vez validados, os circuitos foram adicionados ao equipamento utilizado para medições tanto em campo como em laboratório.

Palavras-chave: Tensões residuais. Método do furo cego. Metrologia óptica. Circuitos eletroeletrônicos robustos. Modulação PWM.

ABSTRACT

The development of specific equipments for the application in the oil and gas industry has been growing during the last years. Considering this context, the project "Special techniques for measuring residual stress with focus on the oil and gas industry - T3 Project" has been included. The aim of the project is the development of equipments and procedures to be used in field in order to measure residual stresses as well as the mechanical properties of the materials applied in gas and oil pipelines.

The T3 project is the result of an earlier project called as CARD3, which also focuses on the measurement of residual stresses. As a first result, it is expected to improve the measurement system which combines the hole drilling technique and optical methods in order to be optimized for in field applications. The incorporation of improvements in hardware and software also aims to enlarge the materials drilling range of the measurement system allowing the evaluation of harder materials as well as alloys with high ductility.

This TCC project deals with the improvements in hardware. Consequently, a set of electronic circuits from the CARD3 project has been replaced and/or modified to achieve more robustness. Among the changed circuits, the PWM modulation circuit with duty cycle of 0 to 100%, commanded by an analog signal, can be highlighted. In addition, other novel circuits have been incorporated due to new functions of the measuring system. They are mainly related to the integration of the new drilling system which is composed of an electric motor. After their validation, the circuits were added to the equipment used for both in field and laboratory measurements.

Keywords: Residual stresses. Hole-Drilling Method. Optical metrology. Robust electrical and electronic circuits. PWM modulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema de Medição.....	19
Figura 2 - Reflexão de ondas luminosas.....	20
Figura 3 - Granulado óptico (<i>speckle</i>).	21
Figura 4- Resultado do processamento das imagens.	22
Figura 5 - Diagrama de blocos do equipamento de medição de tensões residuais.....	24
Figura 6 - Referenciamento entre a peça e a ferramenta.....	24
Figura 7 - Circuito de referenciamento.	25
Figura 8 - Circuito eletroeletrônico de acionamento do LASER.....	26
Figura 9 - Circuito de amplificação.....	27
Figura 10 - Circuito elevador de tensão.....	28
Figura 11 - Acionamento da eletroválvula.....	29
Figura 12 - Base rotativa com os módulos de medição e furação.....	30
Figura 13 - Circuito de acionamento com driver L298.....	31
Figura 14 - Circuito gerador de sinal PWM.....	32
Figura 15 - Circuito eletroeletrônico de acionamento LASER após alteração.....	33
Figura 16 - Circuito gerador de sinal PWM após alteração.....	34
Figura 17 - Circuito e intertravamento LED/LASER.....	36
Figura 18 - Conversão para exibição da rotação.....	38
Figura 19 - Painel lateral do módulo de controle potência.....	39
Figura 20 - Circuito de ativação e da rampa de rotação.....	40
Figura 21 - Circuito de status do funcionamento do controlador.....	41
Figura 22 - Layout da placa principal.....	42
Figura 23 - Layout da placa de expansão.....	43
Figura 24 - Placa de expansão em fase de construção.....	43
Figura 25 - Placa de expansão.....	44
Figura 26 - Placa principal.....	44
Figura 27 - Sinal para energizar o driver antes da alteração.....	47
Figura 28 - Sinal para desenergizar o driver antes da alteração.....	48
Figura 29 - Sinal para energizar o driver depois da alteração.....	48
Figura 30 - Sinal para desenergizar o driver depois da alteração.....	49
Figura 31 - Software Module Switch Test.....	49
Figura 32 - Geração do sinal PWM com o circuito antigo.....	50

Figura 33 - Geração do sinal PWM com o circuito proposto.	50
Figura 34 - Relação entre o nível do sinal aplicado e a largura do pulso.	51
Figura 35 - Intertravamento na ativação: sinal de comando (rosa), laser (amarelo) e LED (azul).	52
Figura 36 - Intertravamento na desativação: sinal de comando (rosa), laser (amarelo) e LED (azul).	53
Figura 37 - Curva de rotação em função da frequência.	54
Figura 38 - Sinal de ativação e rampa.	55
Figura 39 - Forma de onda da sinalização de falha.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	19
2.1	COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	19
2.1.1	Princípio de medição	20
2.2	SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO	22
3	DESENVOLVIMENTO	23
3.1	MÓDULO DE CONTROLE E POTÊNCIA	23
3.1.1	Circuito de referenciamento	24
3.1.2	Driver de corrente do Laser	26
3.1.3	Amplificador do transdutor piezoelétrico (PZT)	26
3.1.4	Acionamento da turbina pneumática	28
3.1.5	Sistema de comutação entre módulo de medição e furação	29
3.2	MELHORIAS E ADEQUAÇÕES APLICADAS AOS CIRCUITOS	32
3.2.1	Alterações aplicadas ao driver de corrente do LASER	32
3.2.2	Alterações aplicadas ao circuito de modulação PWM	33
3.3	CIRCUITOS PROPOSTOS	35
3.3.1	Circuito de intertravamento entre a iluminação LED/LASER	35
3.3.2	Circuitos de acionamento motor elétrico furadeira	36
3.3.2.1	Circuito de exibição da rotação	37
3.3.2.2	Condicionamento do sinal de ativação e rampa de aceleração/desaceleração	38
3.3.2.3	Sinalização de falha do controlador e /ou no motor	40
3.4	INTEGRAÇÃO DOS CIRCUITOS E CRIAÇÃO DO LAYOUT DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	41
3.5	CONFECÇÃO DAS PLACAS PROTÓTIPO PRINCIPAL E EXPANSÃO	41
3.6	SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO	45
4	AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS	47
4.1	RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES AO DRIVER DO LASER	47
4.2	RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES DO CIRCUITO PWM	49
4.3	RESULTADOS DO CIRCUITO DE INTERTRAVAMENTO	52
4.4	RESULTADOS DOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO FURADEIRA	53
4.4.1	Resultados da exibição da rotação	53
4.4.2	Resultados do sinal de ativação e rampa de aceleração/desaceleração	54

4.4.3	Resultados da sinalização de falha no controlador e /ou no motor.....	55
4.5	SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO	56
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
5.1	CONCLUSÕES.....	59
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A.....	63

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do segmento de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil impulsionou o desenvolvimento de equipamentos para monitoramento das condições de operação das linhas de transmissão e/ou produção, tal crescimento visa prevenir desastres ecológicos como a contaminação de solos [1] e oceanos [2].

Com a demanda crescente da indústria do petróleo e gás por equipamentos de inspeção, surgiu a necessidade de aprimorar o equipamento assim como os procedimentos existentes no laboratório. Tais necessidades enquadram a medição de perfis de tensões residuais em diferentes tipos de materiais, juntamente com a medição simultânea de propriedades mecânicas e tensões residuais presentes no material visando sua correlação.

Atualmente o equipamento para estas medições utiliza uma turbina pneumática que opera a 220.000 RPM na execução do furo, cuja rotação foi estabelecida pela norma ASTM E837 para usinar o furo utilizando uma fresa de cone invertido. A faixa de rotações utilizada permite evitar a introdução de novas tensões residuais decorrentes do processo de usinagem, o qual afetaria a medição introduzindo erros nos resultados obtidos [3].

A versão mais recente da norma ASTM estabelece que o processo de furação possa ser realizado utilizando turbinas pneumáticas ou motores elétricos, com velocidades de rotação compreendidas entre 20.000 e 400.000 RPM [4]. Tendo em vista que o principal inconveniente encontrado em turbinas pneumáticas é o seu baixo torque, a realização de furos tanto em materiais de alta dureza assim como em materiais muito dúcteis se transforma em um desafio difícil de ser superado.

Neste contexto, o foco deste trabalho está na implementação de melhorias nos circuitos eletroeletrônicos existentes no hardware atual do sistema de medição de tensões residuais. A substituição do acionamento pneumático pelo elétrico com controle de corrente é uma alternativa para torná-lo compatível com as novas funções do sistema para utilização de medições em campo e laboratório.

1.1 OBJETIVOS

Visando facilitar o entendimento deste trabalho, os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma placa de circuitos eletroeletrônicos com as otimizações e melhoramentos propostos para o novo sistema de medição de tensão residual com base no modelo existente, adequando-o às novas funcionalidades.

1.1.2 Objetivos específicos

O trabalho proposto tem como principal objetivo promover melhorias dos circuitos eletroeletrônicos que compõem a placa principal do sistema, tornando-a mais robusta e confiável. Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Estudar e compreender as funções dos circuitos elétricos existentes na versão atual;
- Levantar os requisitos/funções a serem implementados nos novos circuitos eletroeletrônicos;
- Especificar, adquirir os circuitos integrados;
- Testar e validar em matriz de contato e/ou software de simulação os circuitos propostos;
- Integrar os novos circuitos eletroeletrônicos ao diagrama elétrico geral;
- Desenhar novos layouts das placas de circuito impresso para produção;
- Confeccionar as placas protótipo em circuito impresso;
- Testar e validar e as placas protótipo com todas as suas funcionalidades;
- Documentar os testes.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente é apresentada uma breve explicação sobre o sistema de medição de tensão residual por interferometria óptica. Na sequência são apresentados os componentes do sistema de medição, entre eles estão o módulo de controle e potência. É este módulo que contém a placa principal, cujos circuitos eletroeletrônicos são parte fundamental deste trabalho.

A seguir é apresentada a forma como o trabalho foi desenvolvido. São descritas as melhorias e adequações realizadas nos circuitos elétricos já existentes e posteriormente a integração dos os novos circuitos propostos.

O capítulo seguinte mostra as avaliações experimentais obtidas com estes circuitos eletroeletrônicos, seguidas pela análise e discussão dos resultados. Por fim, a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros são listadas.

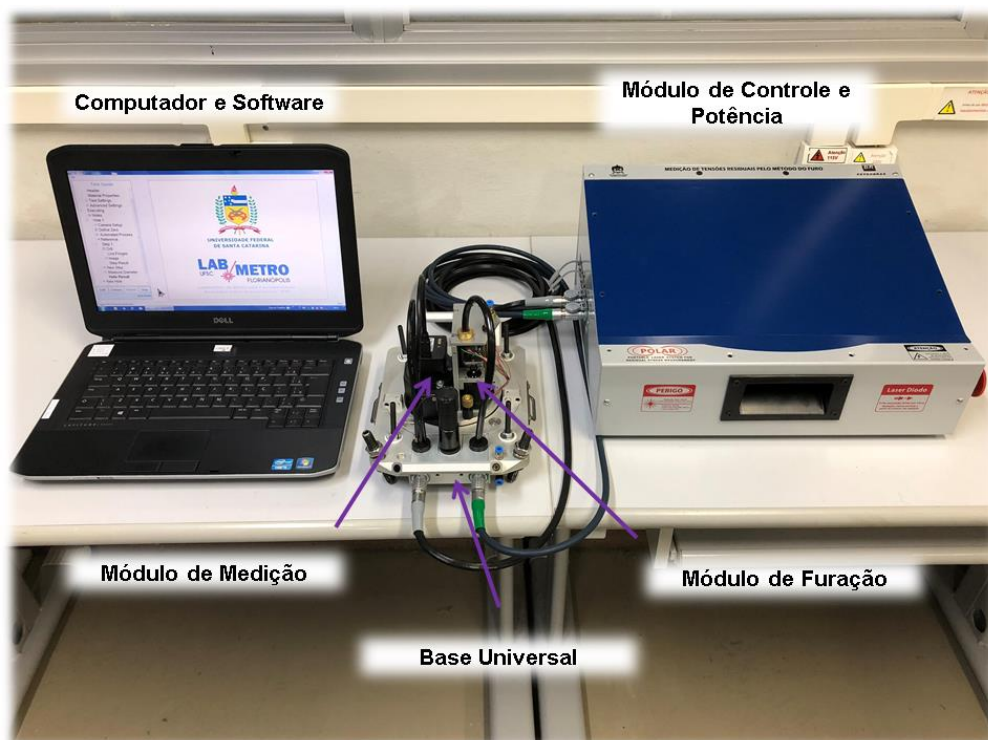
2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

O sistema de medição utilizado para medir tensões residuais pelo método do furo cego é fruto de um desenvolvimento em andamento na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, desde 1992. O sistema modular para medição de tensões residuais é inédito no cenário internacional. Este dispõe de um sistema óptico que utiliza a holografia eletrônica para medir micro-deslocamentos no entorno da borda do furo executado na superfície da peça inspecionada [5]. Por meio deste campo de deslocamentos é possível calcular as deformações e, indiretamente, as tensões combinadas que agem na superfície inspecionada. Este mesmo sistema permite medir tensões mecânicas que agem na peça entre dois estados de carregamento.

2.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O equipamento de medição utilizado neste trabalho é composto pelas seguintes partes, são elas: módulo de furação, módulo de medição, base universal com reposicionamento isostático, módulo de controle e potência e um computador com software dedicado. A Figura 1 ilustra a subdivisão do sistema de medição.

Figura 1- Sistema de Medição.



Fonte: Autoria própria.

A base universal é responsável pela ancoragem à superfície de medição promovendo o posicionamento preciso dos módulos de furação e medição. Já o

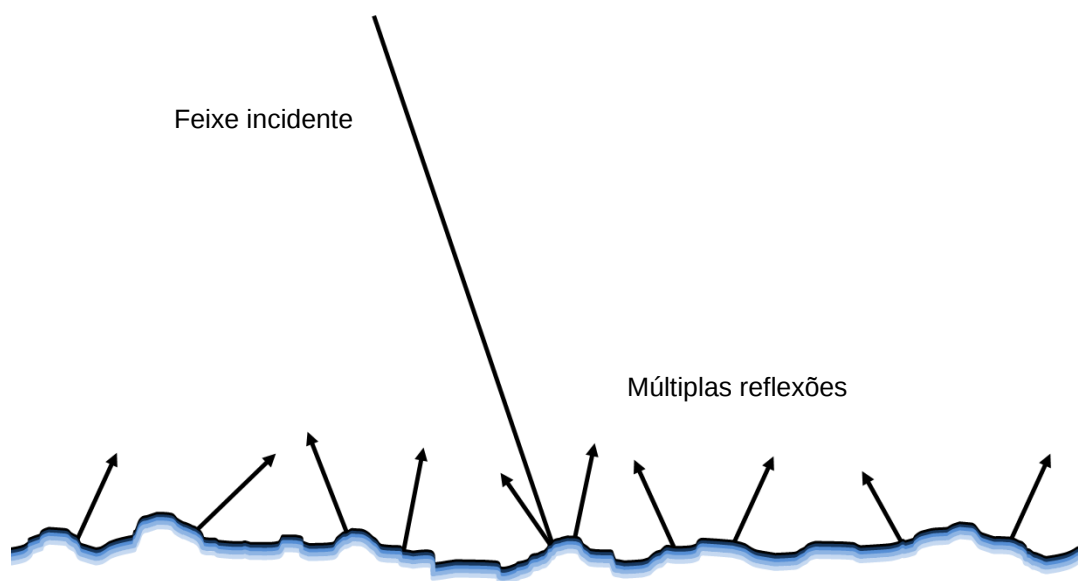
módulo de controle e potência funciona em conjunto com o software dedicado instalado em um computador.

Com a interação entre o operador, software e módulo de controle e potência é possível enviar, receber e processar sinais durante o processo de inspeção. Vale lembrar que é no módulo de controle e potência que se concentram todas as atividades inerentes deste trabalho.

2.1.1 Princípio de medição

O sistema de medição é composto por um interferômetro com um elemento difrativo de modo a obter sensibilidade radial no plano [6]. Isto permite avaliar as variações do campo de deslocamentos na superfície do material em torno do furo os quais são gerados pelo alívio de tensões ocorrido durante a usinagem do furo. O princípio de medição baseia-se na reflexão das ondas luminosas em várias direções devido à rugosidade do material (Figura 2).

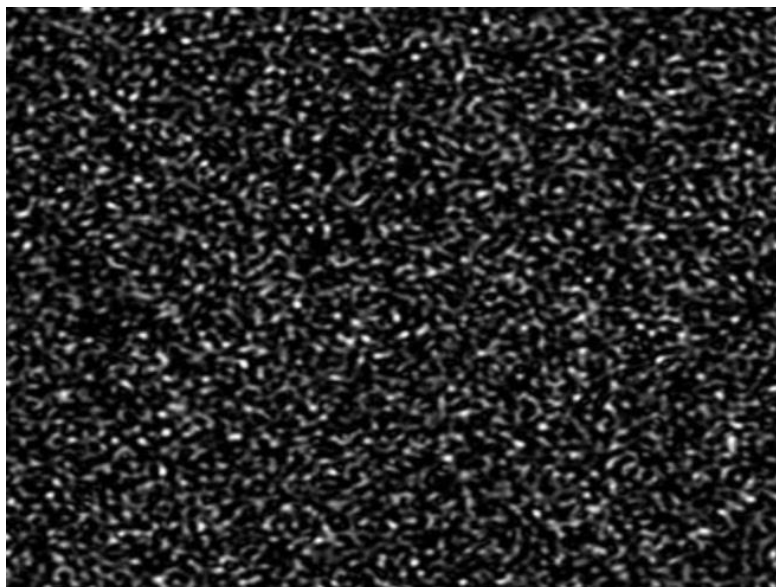
Figura 2 - Reflexão de ondas luminosas.



Fonte: Autoria própria.

Essas ondas luminosas refletidas interferem entre si e formam um granulado óptico, conhecido pelo nome de *speckle*, caracterizado por um padrão de pontos claros e escuros, irregularmente distribuídos conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Granulado óptico (*speckle*).



Fonte: Adaptado de [7].

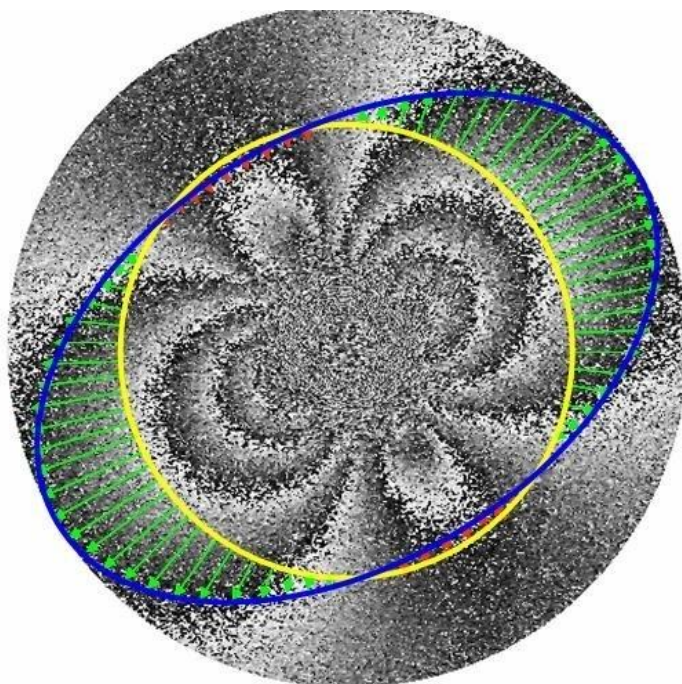
Esses pontos distribuídos aleatoriamente são resultados de interferências construtivas e destrutivas da luz incidente na superfície rugosa. Quando a superfície se deforma, ocorre uma mudança no ângulo de fase e consequentemente mudanças neste padrão do granulado óptico.

Com a utilização de uma câmera é possível capturar este padrão, e utilizando um processamento digital de imagem é possível calcular campos de deslocamentos na superfície medida com incertezas da ordem de 50 nm.

O processo consiste em adquirir uma fotografia, conhecida como imagem de referência antes de iniciar o processo de furação e várias outras durante o decorrer das próximas etapas, os chamados incrementos na profundidade de furação. Assim, via processamento é possível determinar os valores máximo e mínimo das tensões e suas direções principais. A Figura 4 ilustra o resultado obtido deste processamento, onde a linha amarela representa um círculo não deformado antes da execução do furo.

Durante a execução do furo, o material se desloca radialmente de acordo com o estado de tensões residuais presentes. As diferenças entre as imagens permitem calcular a movimentação do material, representada em escala exagerada pelas setas na cor verde e circunscritas pela elipse de cor azul nesta mesma imagem.

Figura 4- Resultado do processamento das imagens.



Fonte: Relatório técnico de projeto.

2.2 SÍNTESE DO SEGUNDO CAPÍTULO

Este capítulo trata do sistema de medição de tensões residuais em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina, cujo projeto deste sistema modular para medição de tensões residuais é inédito no cenário internacional.

Neste capítulo foram apresentadas as subdivisões do sistema em módulo de furação, módulo de medição, base universal, módulo de controle e potência e computador com software dedicado e suas respectivas funções.

Nele é apresentado o princípio de medição e a forma como é possível obter as informações sobre as deformações através do processamento das imagens com a utilização do sistema de medição de tensões residuais.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados de forma detalhada os diversos circuitos eletroeletrônicos que compõem a placa principal do módulo de controle e potência, juntamente com suas respectivas funções. Para facilitar o entendimento, em um primeiro momento são detalhados o módulo de controle e potência e seus correspondentes circuitos eletroeletrônicos, seguidos por cada uma das funções. Na segunda parte são apresentadas as melhorias em cada um dos circuitos, seguidos pelos novos circuitos que agregam novas funções ao equipamento.

3.1 MÓDULO DE CONTROLE E POTÊNCIA

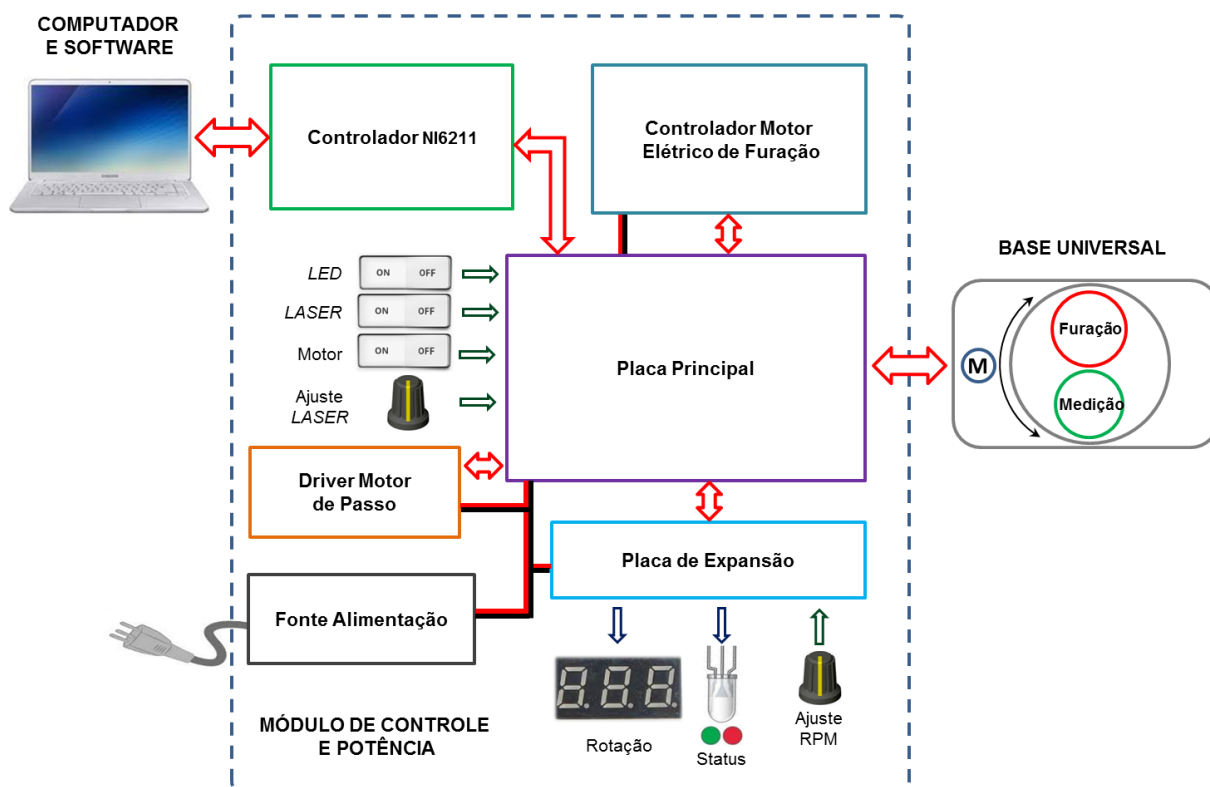
Conforme mencionado, é neste módulo que se concentram todas as atividades deste trabalho. O módulo é composto de vários elementos indispensáveis para o correto funcionamento do equipamento de medição de tensões residuais. Nele, existem fontes de alimentação que convertem a tensão da rede elétrica em variados níveis CC que podem ser utilizados pelos diversos circuitos eletroeletrônicos e atuadores.

Além das fontes de alimentação, existem um driver de motor de passo responsável pelo avanço/incremento de furação e uma eletroválvula pneumática utilizada para acionar a furadeira e sugar o cavaco metálico gerado pelo processo de furação.

O módulo conta ainda com um dispositivo multifuncional de aquisição de dados, denominado NI6211 que contém múltiplas entradas e saídas digitais e analógicas do fabricante *National Instruments* [8]. É por ele que trafegam a grande parte dos sinais que controlam todo o funcionamento do equipamento.

O módulo de aquisição de sinais utilizado do neste projeto é responsável principalmente pela comunicação entre a interface gráfica (software POLAR) instalada no computador e a placa principal que contém múltiplos circuitos eletroeletrônicos dedicados. Para facilitar o entendimento, é apresentado o diagrama de blocos do equipamento (Figura 5), na sequência são descritas as diversas funções dos circuitos eletroeletrônicos que compõem a placa principal.

Figura 5 - Diagrama de blocos do equipamento de medição de tensões residuais.

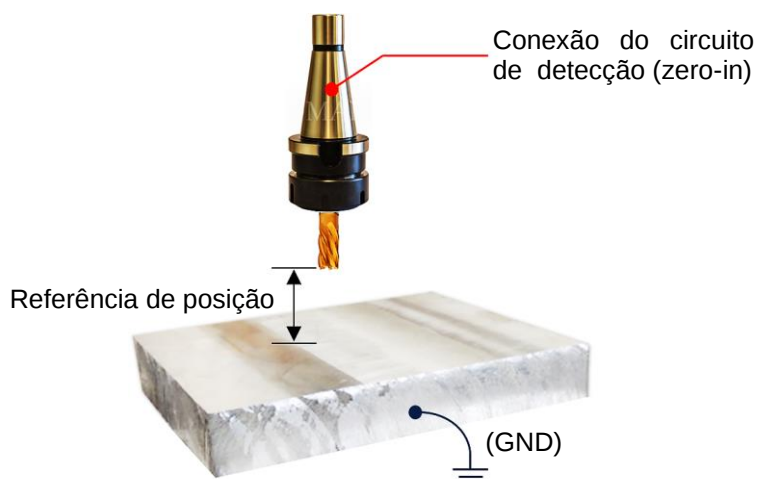


Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Circuito de referenciamento

No processo de inspeção é indispensável que seja criada uma referência de posição para o sistema, isto é, o software necessita identificar a posição relativa entre a ferramenta e a peça a ser inspecionada, sempre que ocorrer a troca de ferramenta ou o início de uma nova inspeção. Com isto é possível controlar a profundidade de furação conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Referenciamento entre a peça e a ferramenta.

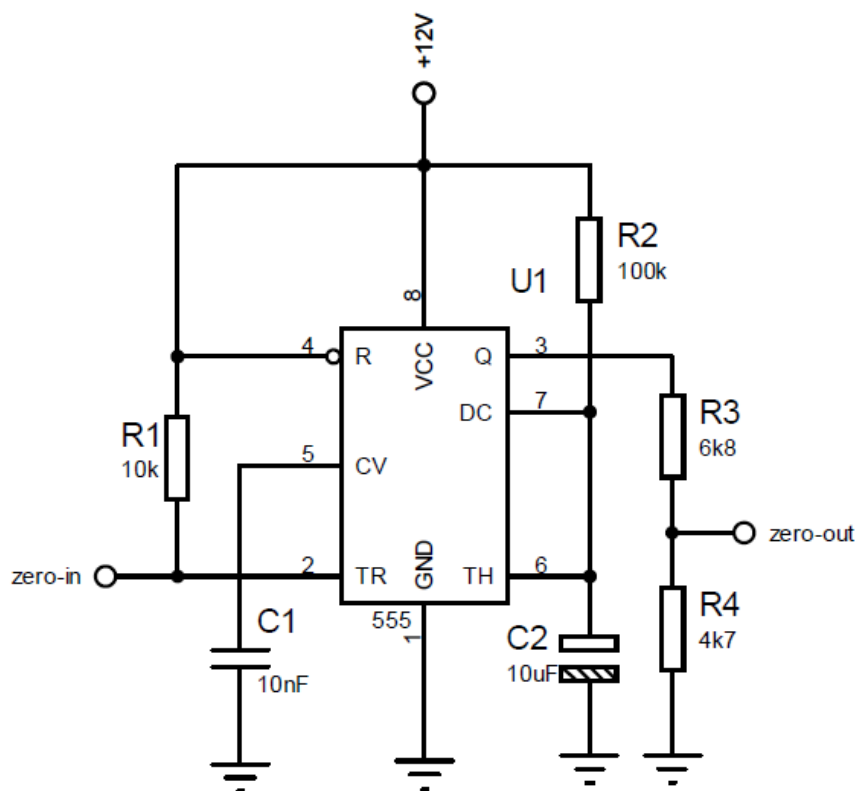


Fonte: Autoria própria.

O circuito de referenciamento é capaz de identificar o momento em que a ferramenta de corte faz contato com o material que está sendo inspecionado. De maneira simplificada o processo de zeragem da ferramenta consiste em avançar ferramenta contra a peça de maneira controlada.

O circuito eletroeletrônico apresentado na Figura 7 é composto por um temporizador com retardo no desligamento de 1 segundo. Este é construído com o circuito integrado LM555, e é capaz de detectar quando ambos, ferramenta conectada a entrada do circuito (zero-in) e a peça conectada a referência do circuito (GND), estão no mesmo potencial elétrico conforme ilustrado na Figura 6 [9]. Neste caso, mesmo potencial significa posição de referência ou zero peça.

Figura 7 - Circuito de referenciamento.



Fonte: Diagrama elétrico principal do projeto CARD3.

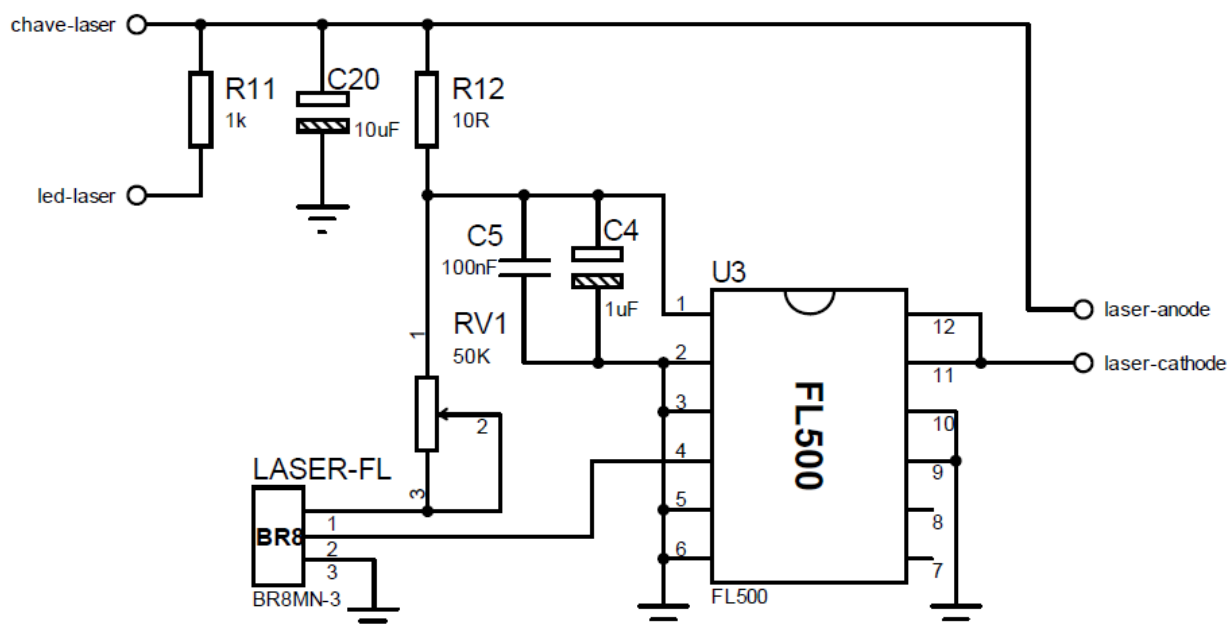
No momento da detecção, o sinal de saída do circuito (zero-out) altera o seu estado lógico e o envia para a placa de aquisição de dados. A temporização aplicada serve principalmente para evitar ruídos provenientes do chaveamento durante a execução das rotinas por parte da placa, sem que haja perda da informação.

3.1.2 Driver de corrente do Laser

O sistema utiliza um diodo emissor de luz LASER com comprimento de onda de 658 nm (vermelho) para iluminar a área da medição, e é através das imagens sob esta iluminação que as tensões presentes no material são obtidas por meio de comparação.

A intensidade luminosa é proporcional a corrente aplicada ao diodo emissor, para este fim o sistema utiliza um driver de corrente comercial denominado FL500 do fabricante *Wavelength Electronics* para o acionamento do laser [10]. O circuito eletroeletrônico utilizado na montagem baseia-se no *datasheet* do componente e é ilustrado na Figura 8. O driver de corrente é energizado pelo acionamento de uma chave eletromecânica conectada a entrada denominada por chave-laser e o controle de corrente é proporcional ao ajuste de um potenciômetro, este fixo a lateral do gabinete e interligado ao borne BR8 de três vias.

Figura 8 - Circuito eletroeletrônico de acionamento do LASER



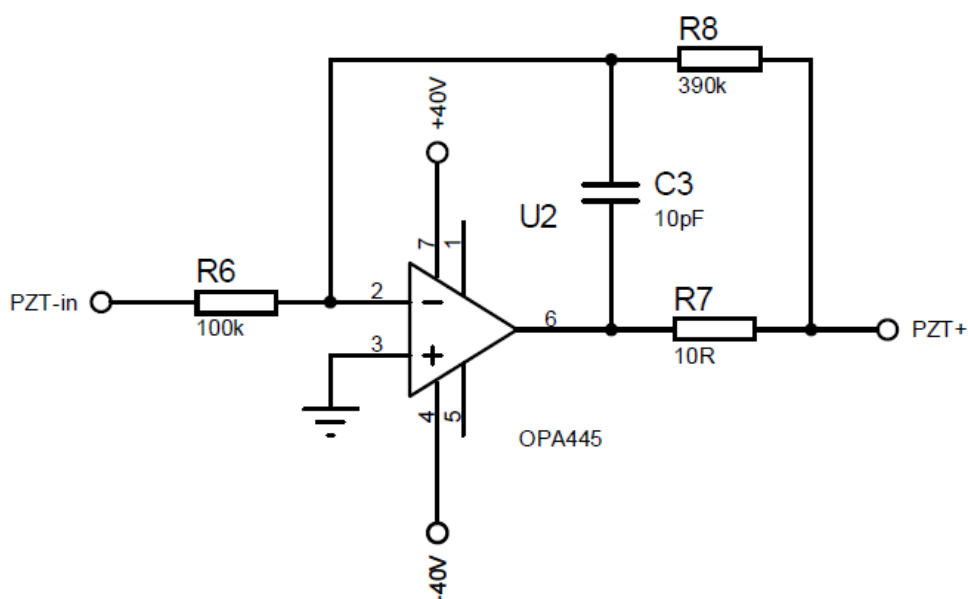
Fonte: Diagrama elétrico principal projeto CARD3.

3.1.3 Amplificador do transdutor piezoelétrico (PZT)

Durante a inspeção é necessário adquirir imagens para o processo de comparação. Como artifício matemático no cálculo dos deslocamentos, as imagens precisam estar modificadas entre si (efeito conhecido na metrologia óptica como defasagem). Para esta função é empregado um transdutor piezoelétrico, cuja função é deslocar um espelho no interior do módulo de medição. Com isto é possível realizar

a modificação da imagem movimentando os espelhos, pois este componente converte tensão elétrica em deslocamento. Tensões que variam entre -30V e 150V podem ser aplicadas ao transdutor. Para este fim é utilizado um circuito de amplificação com o circuito integrado OPA445, com a configuração inversora, onde ao sinal entrada “PZT-in” é aplicado um ganho de 3,9 vezes dado pela relação entre os resistores R8 e R6 conforme ilustra a Figura 9 [11].

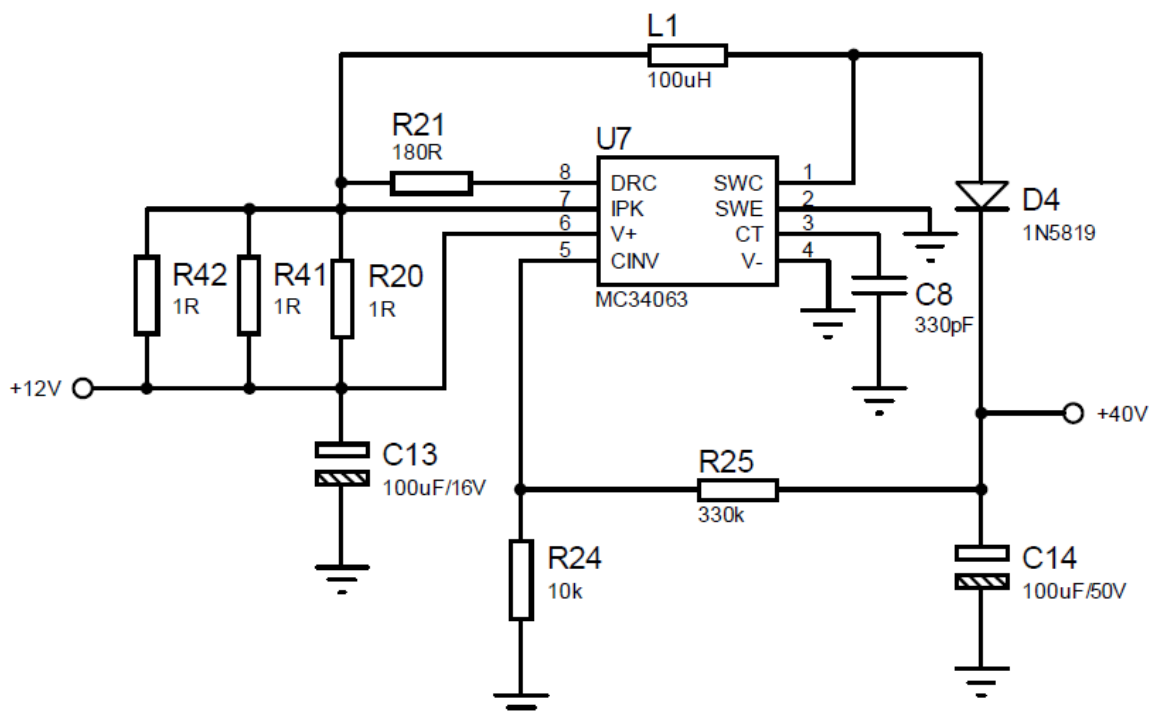
Figura 9 - Circuito de amplificação



Fonte: Diagrama elétrico principal projeto CARD3.

Paralelamente existe um circuito integrado elevador de tensão MC34063 que converte a tensão de entrada +12V em uma tensão de saída de +40V não disponível pelas fontes conforme ilustra a Figura 10 [12]. Com a utilização deste conversor é possível fornecer uma tensão de alimentação simétrica ao amplificador operacional, desta maneira o nível do sinal de saída pode ser amplificado.

Figura 10 - Circuito elevador de tensão



Fonte: Diagrama elétrico principal do projeto CARD3.

3.1.4 Acionamento da turbina pneumática

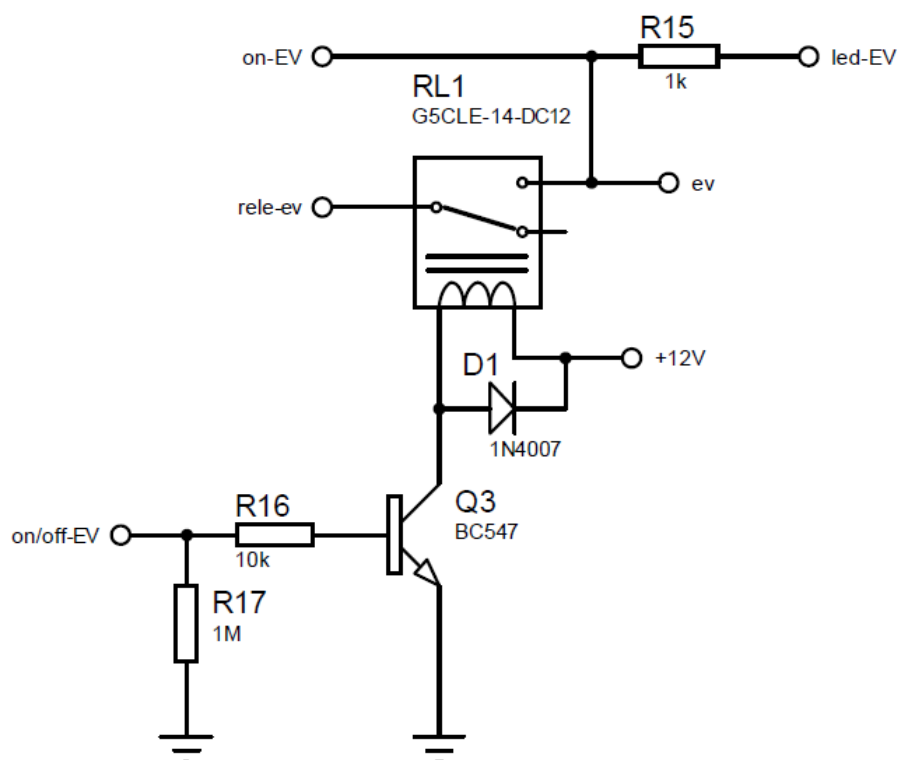
O sistema em questão pode trabalhar de maneira autônoma, parte fundamental deste processo se dá pela utilização de um circuito eletroeletrônico, que pode ser comandado tanto em modo manual quanto automático.

O circuito elétrico é composto por uma chave com três posições (manual, desligado, automático) fixa ao gabinete, um relé e uma chave eletrônica transistorizada (Figura 11). Em modo manual a chave aplica diretamente a tensão de 12 V na entrada “on-EV”, e é direcionada diretamente à saída “ev”.

Já em modo automático, a chave direciona os 12 V para a entrada “rele-ev”. Este sinal só é aplicado a saída “ev” quando o *software* aciona uma saída digital que polariza o transistor através da entrada “on/off-EV”, responsável pela comutação do relé [13][14].

A presença de sinal elétrico na saída “ev” sensibiliza a bobina da eletroválvula liberando o ar comprimido que aciona a turbina pneumática e o sugador de cavacos (sistema antigo). No sistema novo o ar comprimido é utilizado para sucção de cavacos gerados pelo processo de furação, e também para insuflação dos mancais de rolamentos promovendo a dissipação o calor.

Figura 11 - Acionamento da eletroválvula

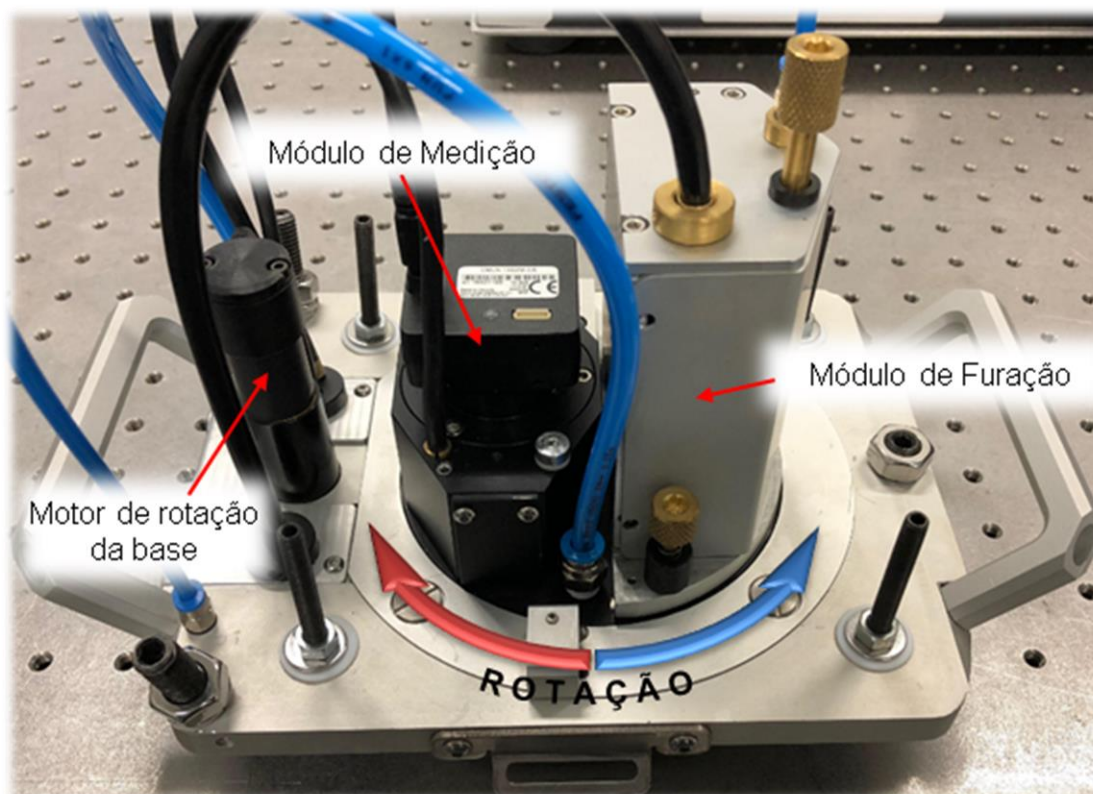


Fonte: Diagrama elétrico principal projeto CARD3.

3.1.5 Sistema de comutação entre módulo de medição e furação

De forma similar ao que acontece com o acionamento anterior, o funcionamento autônomo só é possível devido à comutação entre cabeçote de furação e medição. A principal função da comutação entre cabeçotes é permitir a aquisição das imagens a cada incremento de furação. Para esta aplicação é utilizado um motor de corrente contínua, cuja função é rotacionar os cabeçotes em 180° conforme ilustra a Figura 12.

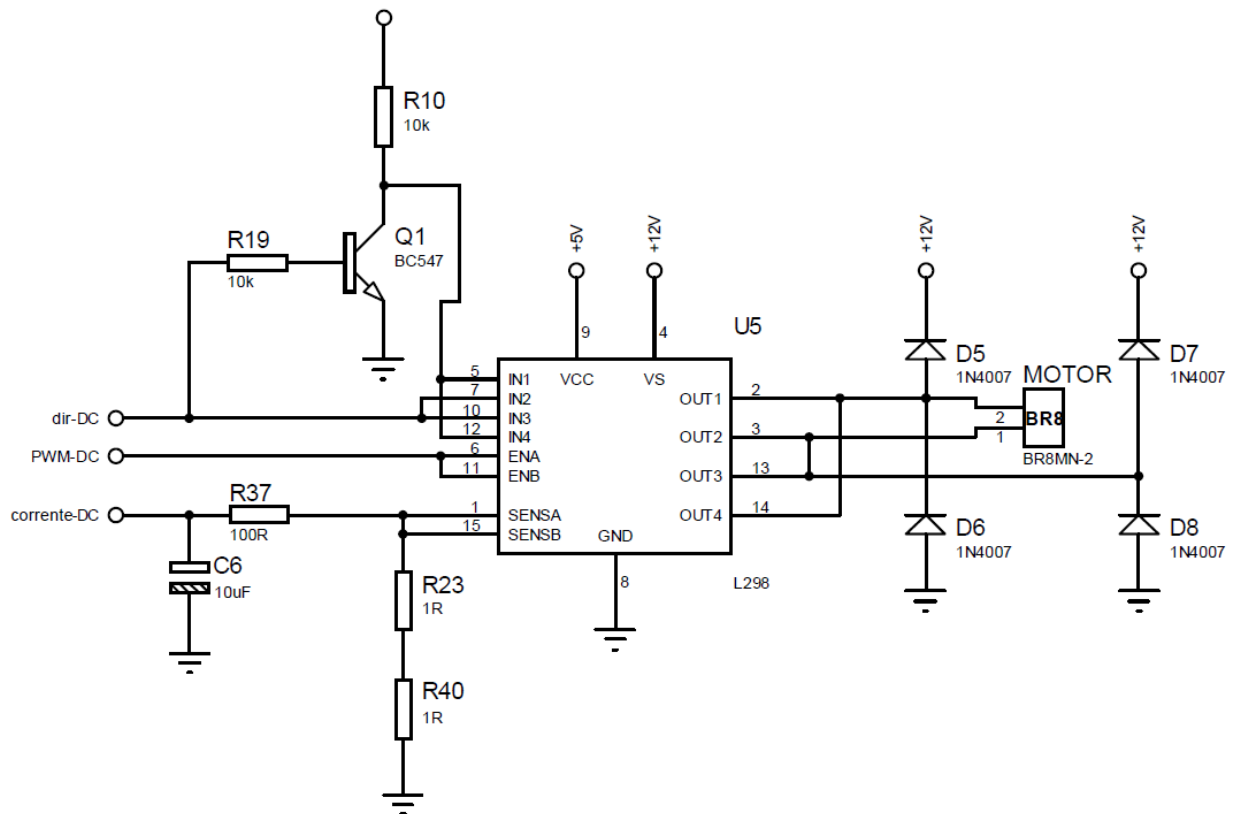
Figura 12 - Base rotativa com os módulos de medição e furação.



Fonte: Autoria própria.

O acionamento do motor utiliza um circuito integrado comercial denominado L298 capaz de fornecer corrente elétrica suficiente [15]. O circuito elétrico de acionamento segue as recomendações do fabricante é ilustrado na Figura 13. Este driver dispõe de duas pontes H internas ligadas em paralelo, para um maior fornecimento de corrente. O funcionamento emprega dois sinais e estes controlam todo o seu funcionamento (direção e velocidade). A direção “dir-DC” é ativada por um sinal digital (0V ou 5V) e é responsável pelo sentido de rotação do motor (horário ou anti-horário).

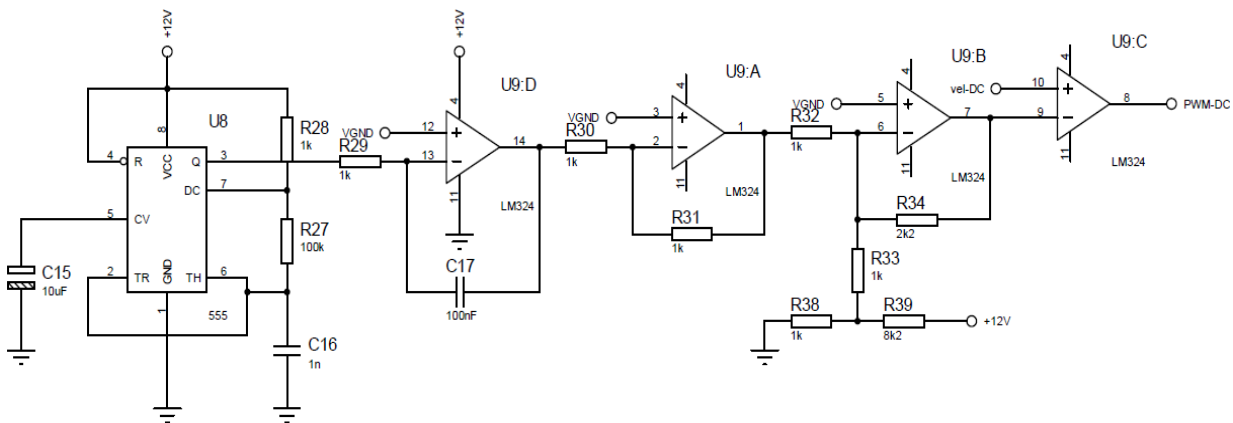
Figura 13 - Circuito de acionamento com driver L298



Fonte: Diagrama elétrico principal do projeto CARD3.

Já a rotação do motor depende de um sinal modulado em largura de pulso (PWM). A construção emprega um gerador de onda triangular com frequência fixa e um comparador de tensão, ilustrado na Figura 14 [16]. Ao aplicar o sinal triangular do gerador e um sinal analógico de controle na entrada do comparador, a saída do comparador apresenta um sinal modulado em largura de pulso (PWM) proporcional à tensão de controle. Este sinal é variável, isto é, quanto maior o nível de tensão analógica, maior o tempo que o sinal de saída permanece alto (5V). Como resultado, aplicando este sinal PWM a entrada do driver L298, é possível controlar a velocidade de giro do motor.

Figura 14 - Circuito gerador de sinal PWM.



Fonte: Diagrama elétrico principal projeto CARD3.

3.2 MELHORIAS E ADEQUAÇÕES APLICADAS AOS CIRCUITOS

Em um primeiro momento logo após compreender as funções de cada um dos circuitos eletroeletrônicos presentes no equipamento. Os trabalhos foram concentrados na comparação do que é proposto pelos fabricantes em suas folhas de dados (*datasheet*), e o que havia sido implementado. Com base nisto e em reuniões com a equipe de projeto, alguns requisitos foram pré-estabelecidos e listados a seguir:

- Alterar a forma de alimentação do driver FL500 e utilizar o pino enable para habilitar a saída de corrente conforme a folha de dados do componente;
- Propor um circuito otimizado de geração de sinal PWM que apresente em sua saída um sinal gradativo de largura de pulso linear, em relação ao sinal de controle;
- Implementar um circuito discreto que impeça a utilização da iluminação LED durante o procedimento de inspeção com iluminação LASER;
- Propor uma forma de acionamento para utilização do motor elétrico que substituirá a furadeira pneumática.

Com base nos requisitos apresentados, os trabalhos concentraram-se primeiramente nas melhorias dos circuitos existentes e posteriormente nos novos que deveriam ser implementados agregando novas funções. A forma com que foram realizados é apresentada a seguir.

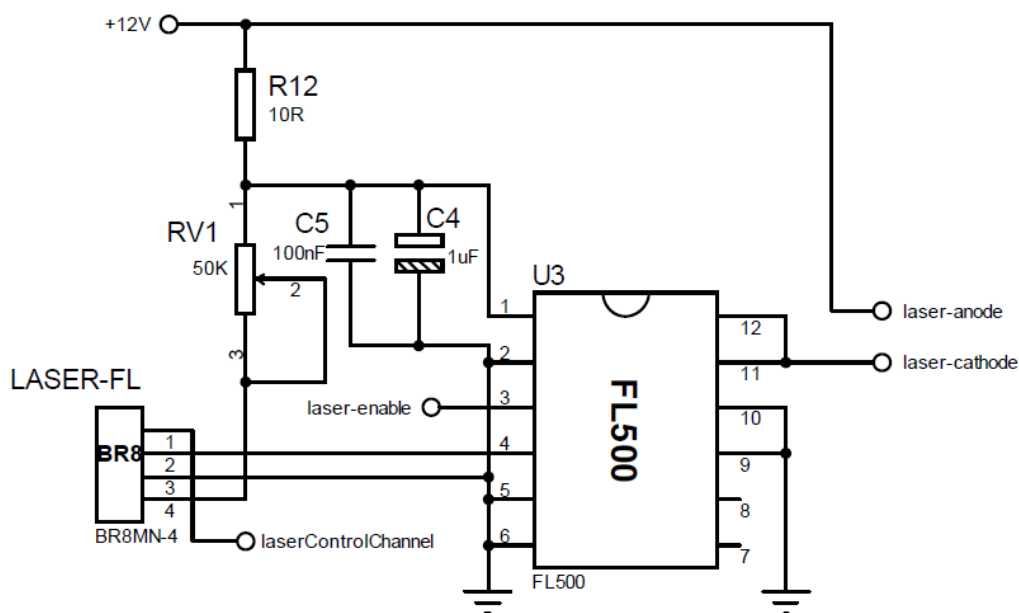
3.2.1 Alterações aplicadas ao driver de corrente do LASER

Conforme mencionado anteriormente o sistema utiliza um diodo laser emissor de luz para iluminar a área de medição cuja intensidade luminosa é proporcional à corrente aplicada. O diagrama inicial utilizava o sinal proveniente diretamente da

chave para alimentar o circuito do driver de corrente. A solução empregada foi separar os sinais de alimentação e ativação. O driver foi alimentando diretamente com a tensão da fonte e o sinal da chave foi usado para habilitar o driver pelo pino correspondente “laser-enable”.

Como resultado espera-se que os componentes internos atinjam a estabilidade térmica de maneira mais rápida uma vez que o driver é energizado juntamente com o equipamento. O circuito com a devida alteração é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Circuito eletroeletrônico de acionamento LASER após alteração



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Alterações aplicadas ao circuito de modulação PWM

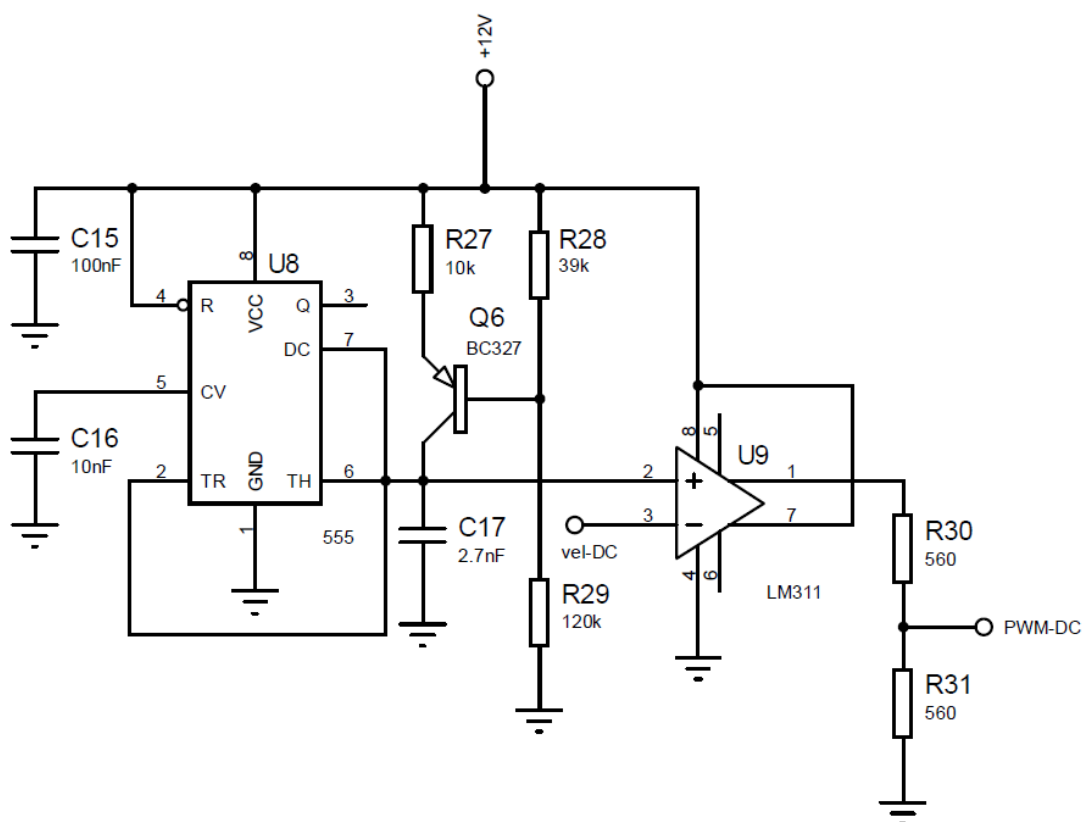
Analisando detalhadamente o circuito utilizado anteriormente na Figura 14, percebe-se que um grande número de componentes foram utilizados para criar um sinal modulado em largura de pulso. O circuito foi concebido com diversas etapas de conversão de sinal, iniciando com a geração de uma onda quadrada, seguida pela conversão em onda dente triangular por um circuito integrador que após o ajuste de offset foi interligada ao comparador para gerar o sinal PWM.

Diversas tentativas foram realizadas visando melhorar o circuito existente. Os testes experimentais utilizaram matriz de contatos como uma forma de prototipação rápida. As montagens compreenderam desde a alteração nos valores resistivos, até o arranjo do circuito com a inserção de alguma interconexão ou remoção desta.

Desafortunadamente, os testes experimentais não apresentaram efeitos positivos quando comparados com o arranjo atual em utilização.

Como consequência, a solução encontrada esteve baseada em um estudo mais aprofundado da folha de dados do componente (LM555), visto que o sinal de saída do componente é baseado em um circuito interno de comparação e em um circuito de carga RC [9]. É sabido que um sinal modulado PWM pode ser obtido através da comparação entre dois sinais, um deles triangular e outro analógico. Com base nestas informações, para obtenção do sinal triangular, utilizou-se o circuito integrado LM555 com seus comparadores internos e um circuito RC com carga constante por meio de um driver transistorizado. Na etapa seguinte este sinal foi comparado com um sinal analógico proveniente do módulo de aquisição de sinais dando origem ao sinal modulado em largura de pulso com frequência arbitrada pela onda triangular [17]. O circuito sofreu mudanças significativas em relação ao existente e ele está detalhado na Figura 16.

Figura 16 - Circuito gerador de sinal PWM após alteração



Fonte: Autoria própria.

3.3 CIRCUITOS PROPOSTOS

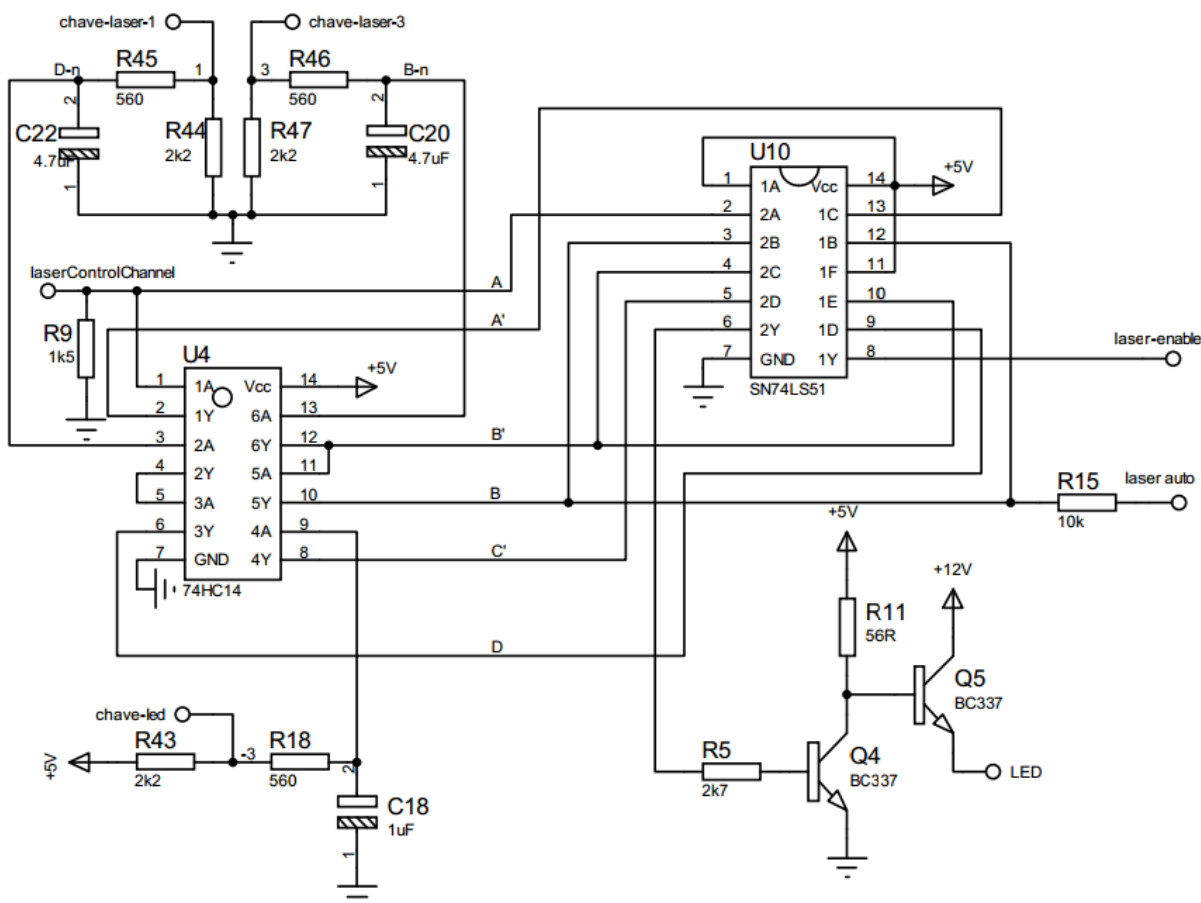
Após a finalização das melhorias e adequações nos circuitos eletroeletrônicos herdados do sistema de medições de tensão residual existentes, partiu-se em busca de soluções para as novas funções do sistema. Na sequência, a solução encontrada para lógica de intertravamento entre a iluminação LED e LASER é apresentada. Em seguida, a solução de acionamento do motor elétrico de furação é detalhada.

3.3.1 Circuito de intertravamento entre a iluminação LED/LASER

O sistema de medição de tensões residuais dispõe de dois tipos de iluminação. Um na cor branca (com leds), que serve exclusivamente para montagem e posicionamento do sistema sobre a superfície de medição. E a outra, a iluminação LASER (vermelha) que é indispensável para a medição por se tratar de uma iluminação com comportamento estável no tempo e espaço. A sobreposição das duas iluminações durante uma medição pode interferir no resultado final comprometendo o ensaio. Consequentemente, a simultaneidade de ambas as fontes deve ser evitada pela eletrônica de controle.

Com foco neste problema, um circuito envolvendo uma lógica de intertravamento foi elaborado para controle durante a inspeção [18][19][20]. Caso a chave de controle da iluminação LASER esteja em modo automático, o software efetua a comutação mantendo como default a iluminação LASER ativa. Entretanto, se a chave estiver em modo manual ou desligada a iluminação LED não sofre influência alguma. Porém, na tentativa de prosseguir com o ensaio, o software sinaliza para o operador que a chave de ativação do LASER não se encontra em modo automático. A Figura 17 ilustra o circuito lógico responsável por esta função.

Figura 17 - Circuito e intertravamento LED/LASER.



Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Circuitos de acionamento motor elétrico furadeira

Conforme mencionado anteriormente, a substituição do sistema pneumático pelo elétrico é uma alternativa para superar boa parte das restrições de execução dos ensaios, aumentando a flexibilidade e velocidade para utilização de medições em campo e no laboratório.

O novo sistema de furação além de utilizar o ar comprimido para sucção de cavacos gerados pelo processo de furação, é utilizado para insulflação dos mancais de rolamentos, promovendo a dissipação o calor. Para o novo módulo de furação foi selecionado pela equipe de projeto o motor elétrico *brushless* EC 22 do fabricante Maxon devido a suas características elétricas e mecânicas [21].

Paralelamente foi realizada a seleção do controlador juntamente com a placa de desenvolvimento, de acordo com a recomendação do fabricante em seu catálogo eletrônico disponível via site [22][23][24]. Um estudo detalhado da folha de dados do

controlador permitiu realizar a seleção dos componentes eletroeletrônicos para a interligação e controle das funções disponíveis, são elas:

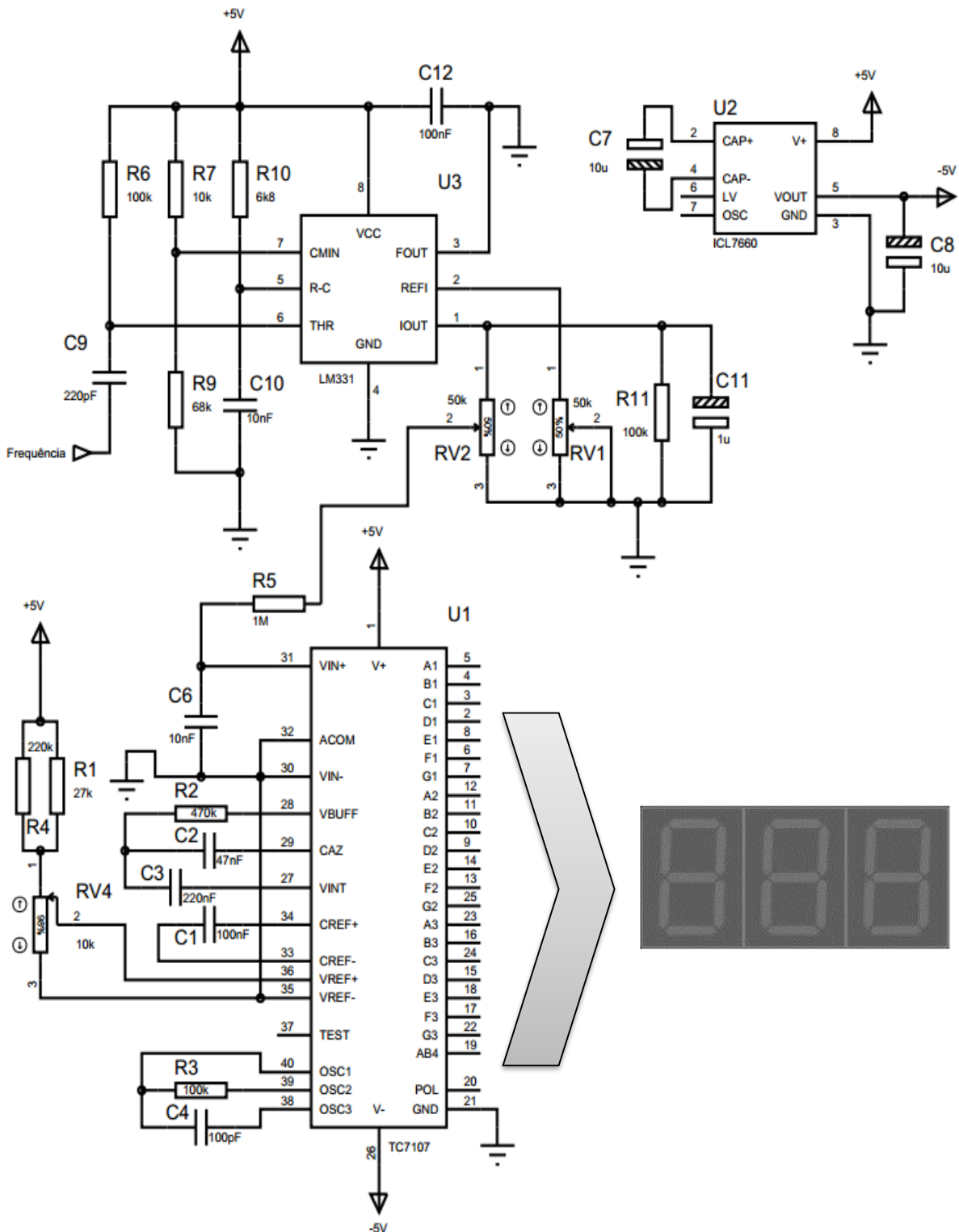
- Leitura e conversão do sinal para exibição correspondente da rotação instantânea do motor elétrico;
- Condicionamento do sinal de ativação juntamente com a rampa de aceleração/desaceleração do motor;
- Sinalização de falha do controlador e/ou no motor.

3.3.2.1 Circuito de exibição da rotação

Diante da necessidade em poder identificar o valor da rotação do motor durante as etapas de furação, foi necessário a implementação de um circuito elétrico para esta finalidade.

Partindo de um sinal digital pulsado proveniente do controlador em que a variação de frequência é diretamente proporcional à rotação do motor, um conversor frequência/tensão denominado LM331 foi utilizado para a conversão do sinal pulsado em um sinal analógico [25]. Este sinal foi aplicado ao circuito integrado ICL7107, que possui internamente um conversor analógico com um decodificador para display de sete segmentos [26][27]. Na sequência é apresentado o circuito de conversão para amostragem da rotação do motor elétrico responsável pela furação, Figura 18.

Figura 18 - Conversão para exibição da rotação.



Fonte: Autoria própria.

3.3.2.2 Condicionamento do sinal de ativação e rampa de aceleração/desaceleração

Diversos são os sinais que controlam o funcionamento do motor, alguns deles podem ser ajustados diretamente na própria placa de desenvolvimento. Já outros por

recomendação da equipe de projeto mecânico, necessitam de uma atenção especial para não comprometer o funcionamento ou até mesmo a falha do conjunto mecânico.

Entre estes sinais, estão o de ativação do driver e da rampa de aceleração/desaceleração do motor elétrico de furação. Para a ativação do motor foi implementado um circuito RC, cuja principal função é evitar que o motor seja frenado abruptamente e possa danificar o conjunto mecânico.

Para a rampa de aceleração/desaceleração, a solução encontrada foi utilizar um circuito integrador, cuja tensão de saída é proporcional ao sinal proveniente de um divisor de tensão [28]. Este valor é estabelecido pela resistência de um potenciômetro fixo na placa lateral do módulo de controle e potência conforme ilustra a Figura 19.

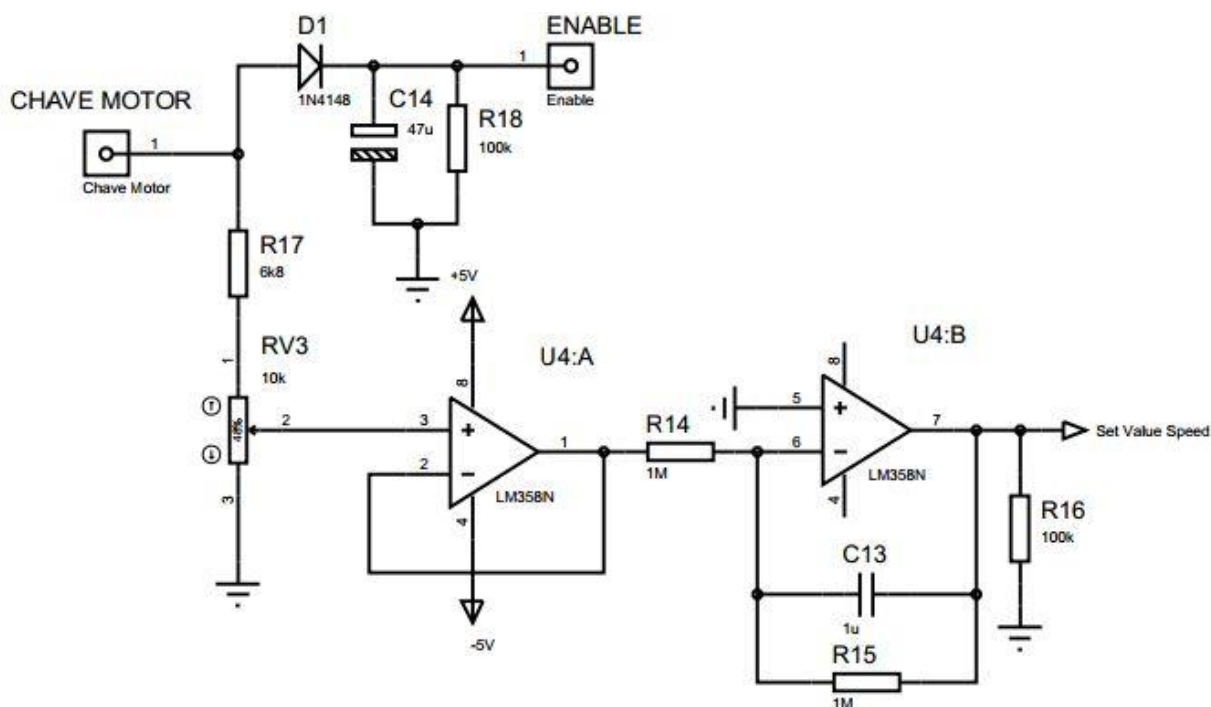
Figura 19 - Painel lateral do módulo de controle potência.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 ilustra os circuitos de ativação e da rampa de rotação implementados na placa de expansão.

Figura 20 - Circuito de ativação e da rampa de rotação.



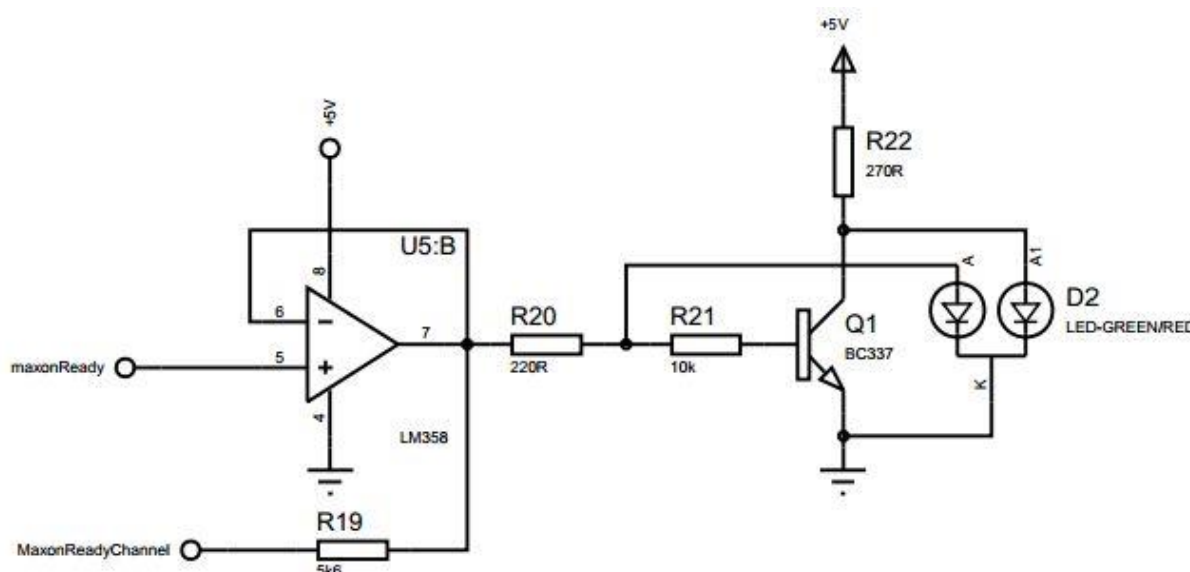
Fonte: Autoria própria.

3.3.2.3 Sinalização de falha do controlador e /ou no motor

Paralelamente aos sinais de controle, a placa controladora disponibiliza uma saída digital cuja função é sinalizar as seguintes falhas: (a) sobre corrente no motor devido a um curto, (b) aquecimento e (c) perda de conexão.

O circuito de sinalização empregado é composto por um buffer de corrente, que possui uma alta impedância de entrada, seguido por um circuito transistorizado para acionamento de um LED bicolor nas cores vermelho e verde [20][28]. O LED é fixo na lateral do módulo de controle conforme ilustra a Figura 19, quando em funcionamento normal permanece na cor verde e em caso de falha muda sua iluminação para vermelho. O circuito implementado é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Circuito de status do funcionamento do controlador.



Fonte: Autoria própria.

3.4 INTEGRAÇÃO DOS CIRCUITOS E CRIAÇÃO DO LAYOUT DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Após a finalização dos trabalhos de seleção, dimensionamentos e testes em matriz de contatos foi necessário alterar o diagrama elétrico da placa principal e criar o diagrama geral da placa de expansão no software ISIS da plataforma Proteus [29]. Além dos circuitos que sofreram melhorias e adequações na placa principal, o circuito de intertravamento entre a iluminação LED/LASER também foi integrado.

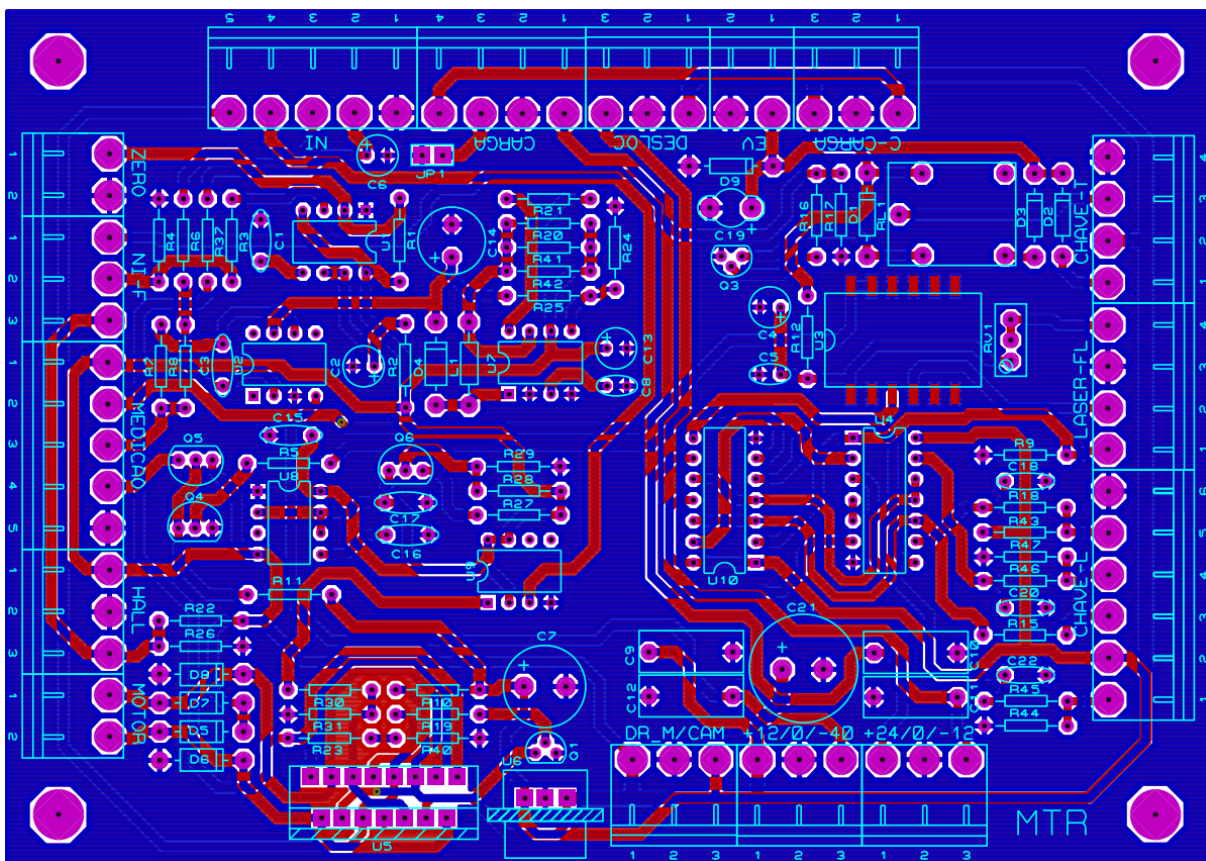
Já a placa de expansão que faz parte do acionamento do motor elétrico de furação recebeu os circuitos que compreenderam as funções de ativação, rampa de aceleração/desaceleração, exibição de rotação e status de funcionamento. Após a finalização desta etapa, foi dado início a confecção das placas protótipo.

3.5 CONFECÇÃO DAS PLACAS PROTÓTIPO PRINCIPAL E EXPANSÃO

Com a finalização dos diagramas, iniciou-se a criação do layout com a inserção dos componentes de forma virtual utilizando o software ARES, também da Plataforma Proteus [29]. A placa principal foi a primeira a ser trabalhada, a Figura 22 ilustra o resultado final do processo de criação em software. Como parâmetros foram utilizadas trilhas com espessura entre 30 e 40 *mils* (0,762 -1,016)mm para níveis de sinal e 60 *mils* (1,524mm) para níveis de potência e espaçamento mínimo de 40 *mils* entre trilhas. Já para as vias foi utilizado 40 *mils* de diâmetro externo e furo metalizado metalizado de 15 *mils* (0,381 mm) interno. Para os conectores foi utilizado *pads* com

150 mils e furo metalizado metalizado de 60 mils (1,524 mm), nos demais componetes foi utilizado entre 55 e 65 mils de diametro externo com furo metalizado metalizado de 30 mils. A espessura da placa escolhida foi de 1,6mm com 1 OZ (0,035mm) de espessura da lamina de cobre. Todos os valores apresentados foram ajustados levando-se em conta as limitações de fabricação imposta pela empresa responsavel pela prototipação das placas.

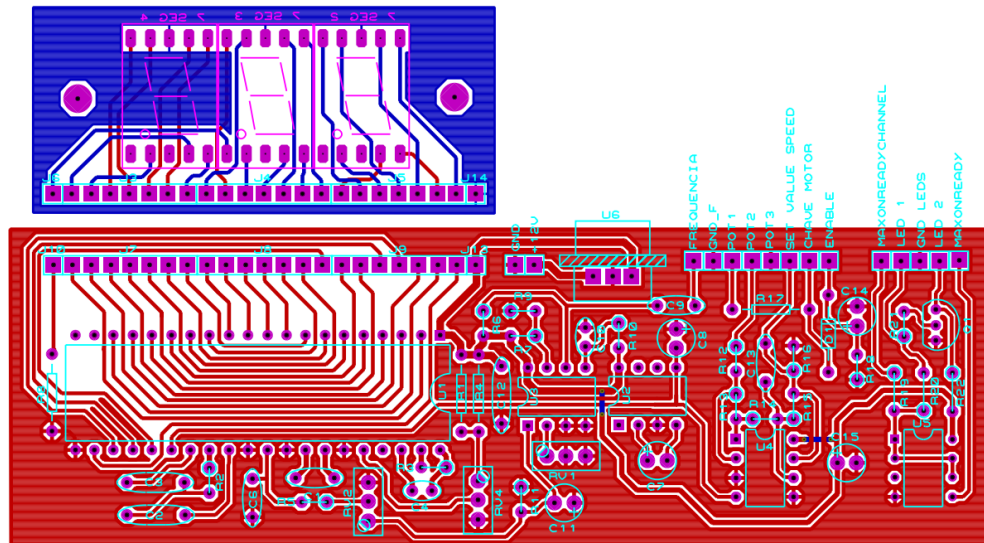
Figura 22 - Layout da placa principal.



Fonte: Autoria própria.

Após a finalização do *layout* da placa principal, os trabalhos foram concentrados na criação do *layout* da placa de expansão. A Figura 23 ilustra o resultado do processo.

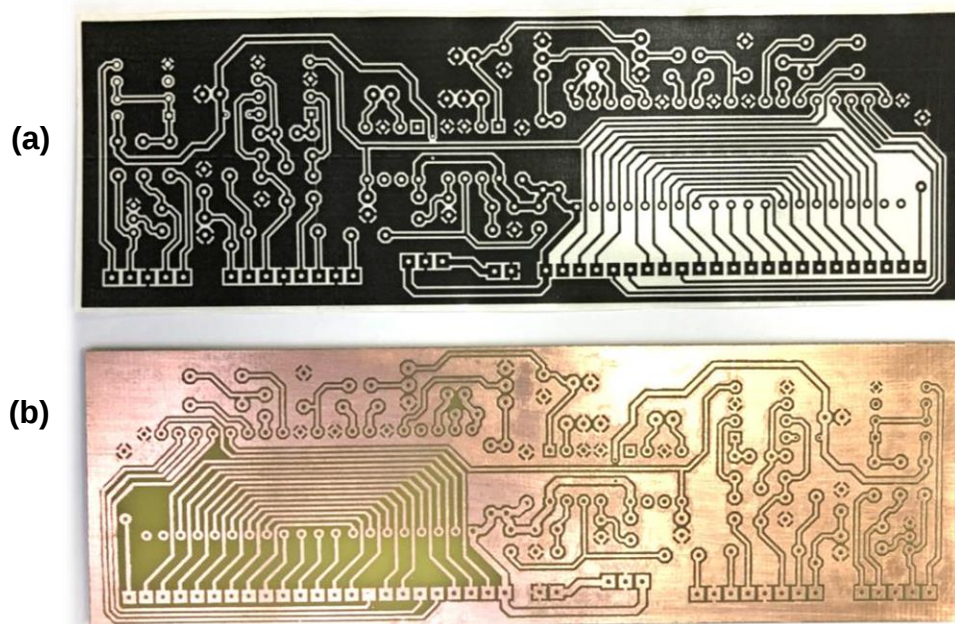
Figura 23 - Layout da placa de expansão.



Fonte: Autoria própria.

Nas etapas seguintes ocorreu a materialização das placas. Estas começaram a criar forma com a transferência da imagem para a lâmina cobreada da placa de fibra de vidro, utilizando o processo de serigrafia manual. Logo após a transferência da imagem, as placas passaram pelo processo de corrosão do cobre formando as trilhas e ilhas para montagem dos componentes. A Figura 24 ilustra o processo de criação da placa de expansão, desde a folha de impressão (a), até a placa após a corrosão (b).

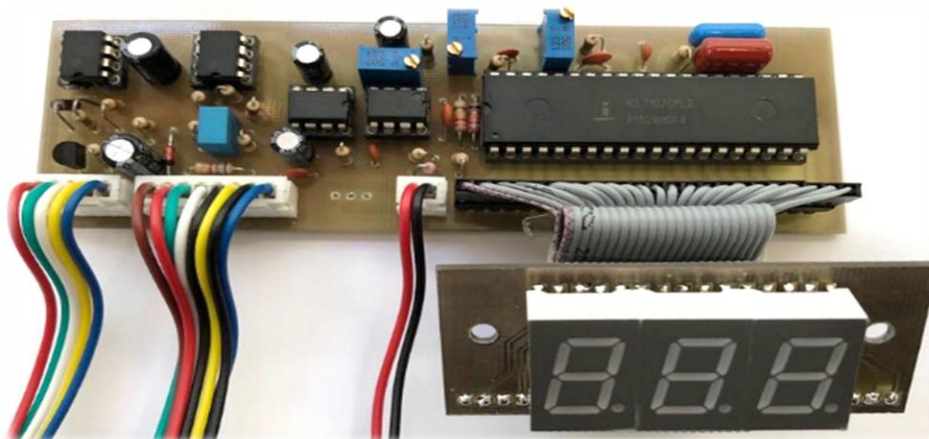
Figura 24 - Placa de expansão em fase de construção.



Fonte: Autoria própria.

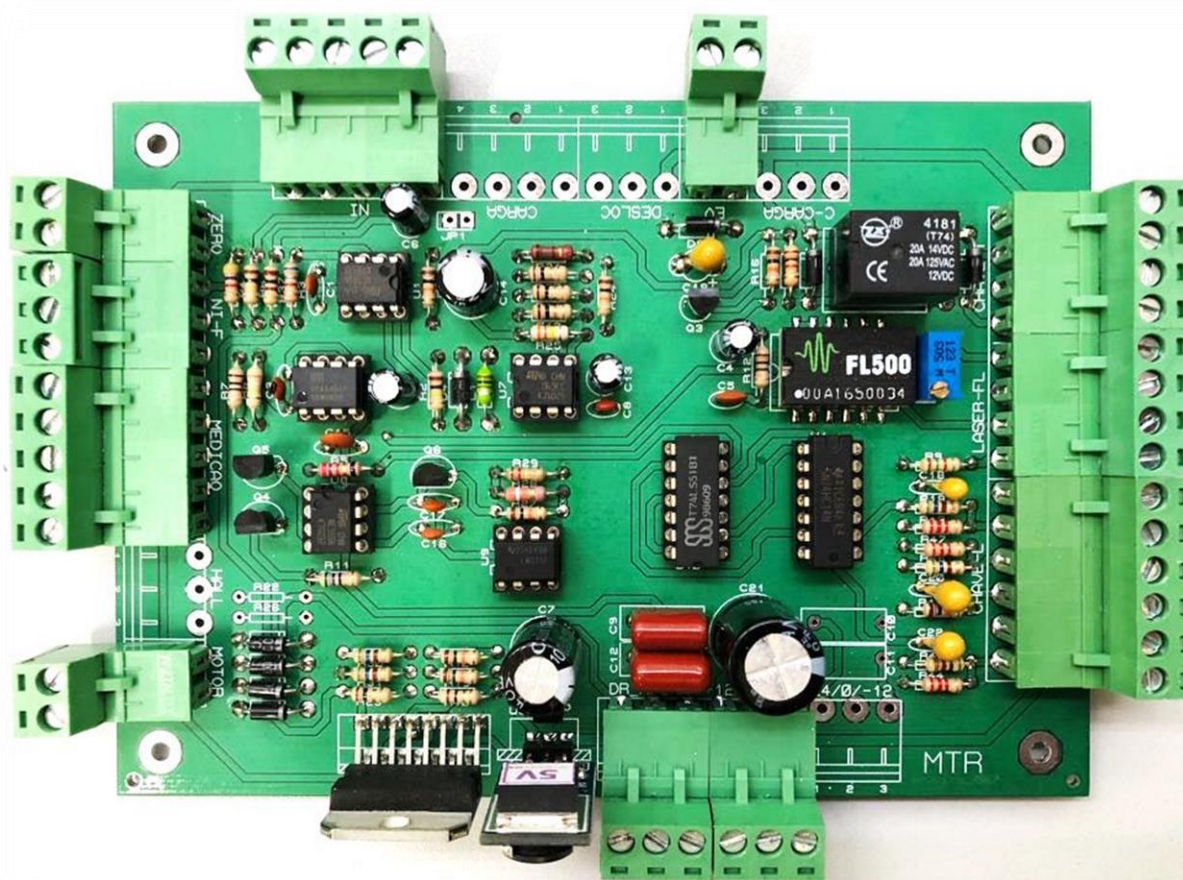
Finalizada esta etapa para ambas as placas principal e de expansão, foram realizadas a furação e montagem de ambas as placas. Estas são ilustradas nas figuras seguintes, onde a Figura 25 corresponde a PCI (Placa de circuito Impresso) de expansão e a Figura 26 à placa principal.

Figura 25 - Placa de expansão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Placa principal.



Fonte: Autoria própria.

3.6 SÍNTESE DO TERCEIRO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram descritos inicialmente de forma detalhada os diversos circuitos eletroeletrônicos que compõem a placa principal do módulo de controle e potência e suas respectivas funções no sistema atual.

Na sequência foram apresentadas as melhorias e adequações aplicadas a alguns dos circuitos eletroeletrônicos. Seguindo a diante, foram apresentados os circuitos propostos para as novas funções para a iluminação e funcionamento do motor elétrico de furação.

Ao final deste capítulo foram descritas as etapas de integração dos circuitos nos diagramas gerais, criação dos *layouts* das placas protótipo e a finalização com as suas respectivas confecções e montagens.

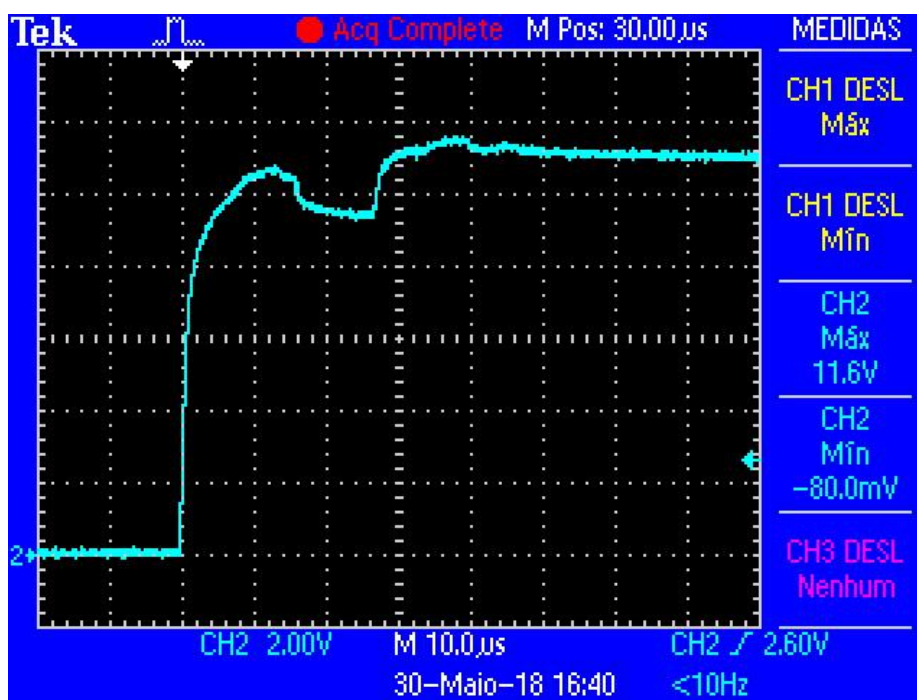
4 AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são descritos os testes e resultados obtidos na validação dos circuitos propostos com o equipamento em sua montagem final. Inicialmente são apresentados os resultados das melhorias e adequações aplicadas aos circuitos do driver de corrente do laser e a modulação PWM. Na sequência são expostos os resultados referentes aos novos circuitos relacionados à iluminação LED/LASER e ao acionamento do motor elétrico.

4.1 RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES AO DRIVER DO LASER

Conforme mencionado no item 3.1.2, o driver de corrente é energizado ao acionar uma chave eletromecânica que interliga a saída em tensão da fonte ao pino de alimentação do driver. A Figura 27 ilustra a forma de onda antes da alteração do circuito elétrico. Na imagem, é possível verificar que o sinal necessita de aproximadamente 50 μ s para estabilizar após a comutação da chave.

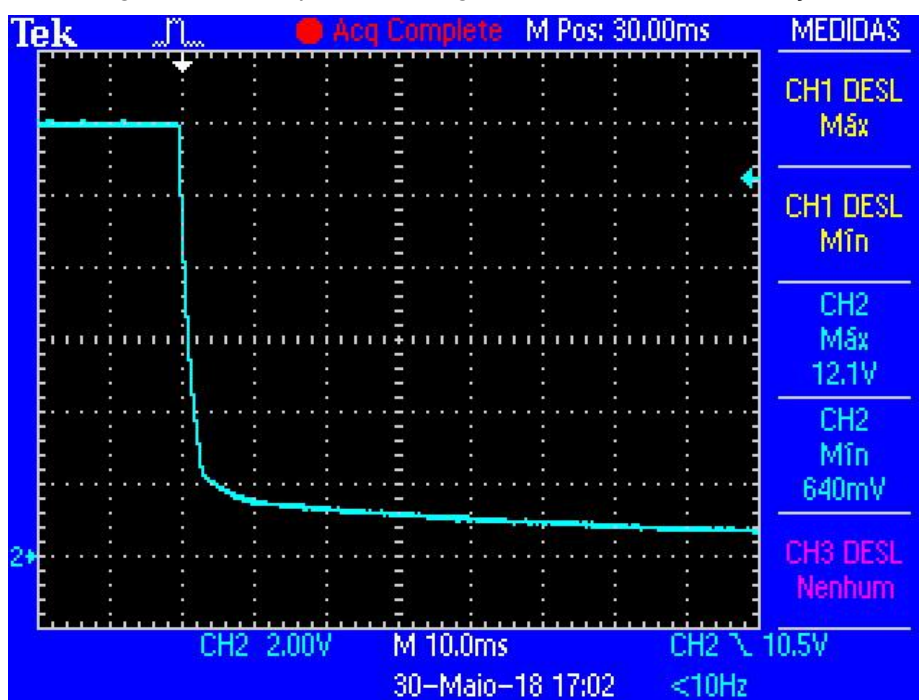
Figura 27 - Sinal para energizar o driver antes da alteração.



Fonte: Autoria própria.

Já a comutação da chave para desenergizar o driver apresenta um tempo superior ao de energização. Conforme pode ser verificado na Figura 28, este tempo é superior a 80 ms para alternar entre o estado lógico alto e o baixo.

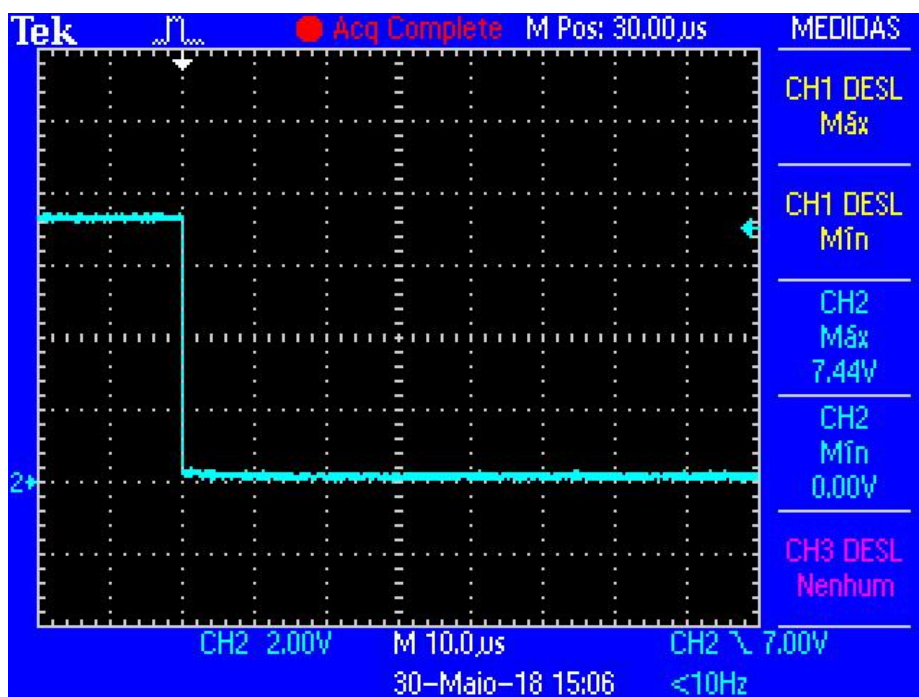
Figura 28 - Sinal para desenergizar o driver antes da alteração.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência são apresentados os resultados após a alteração do circuito. A Figura 29 ilustra a forma de onda na ativação do driver com um tempo de estabilização inferior a 1 μ s, sendo 50 vezes menor quando em comparação com a configuração de ativação anterior.

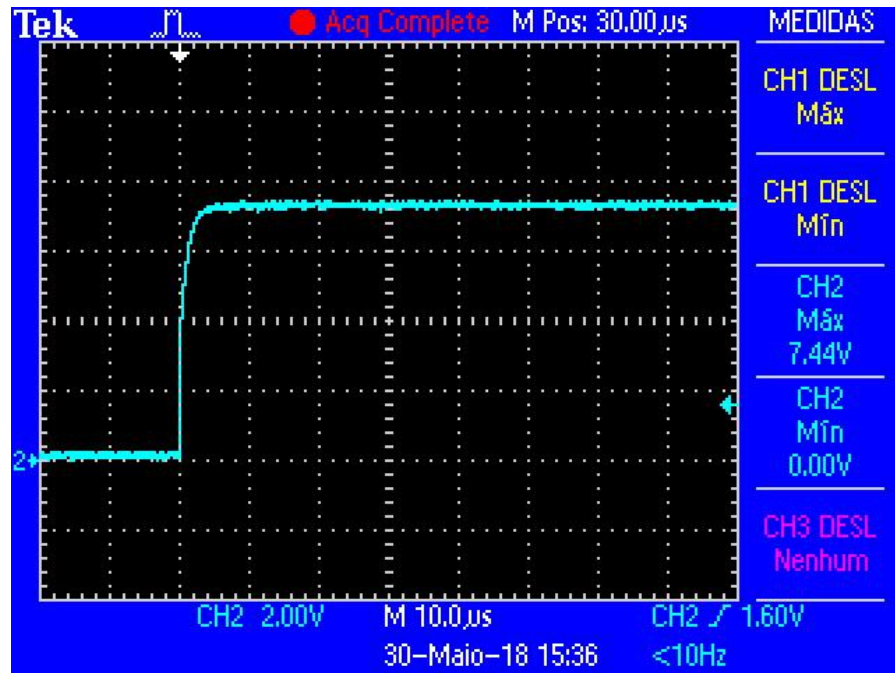
Figura 29 - Sinal para energizar o driver depois da alteração.



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 30 é possível verificar que o sinal de desativação leva aproximadamente 6 μ s para estabilizar, como resultado o circuito é estabilizado em um tempo aproximadamente 13000 vezes inferior.

Figura 30 - Sinal para desenergizar o driver depois da alteração.

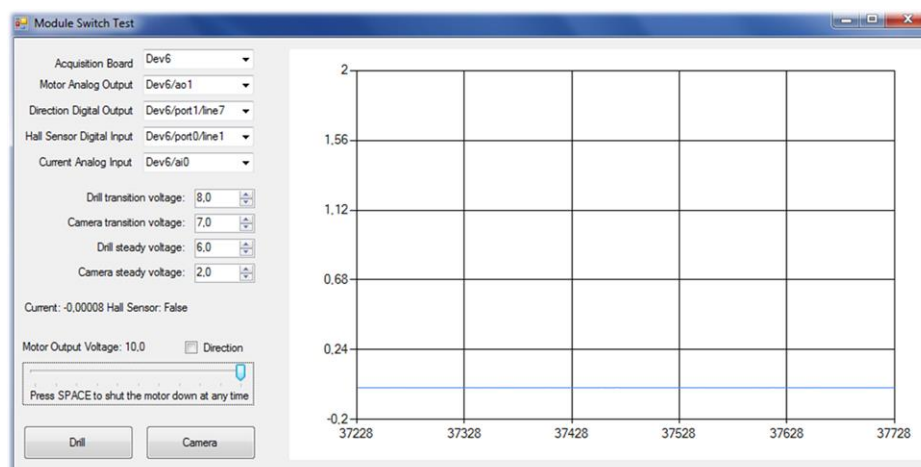


Fonte: Autoria própria.

4.2 RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES DO CIRCUITO PWM

Conforme descrito no item 3.2.2 o sinal modulado é obtido através da comparação de dois sinais, um deles triangular e outro analógico. Para a validação do circuito proposto e a comparação dos resultados foi utilizado o software de calibração - desenvolvido pela equipe - denominado *Module Switch Test* (Figura 31).

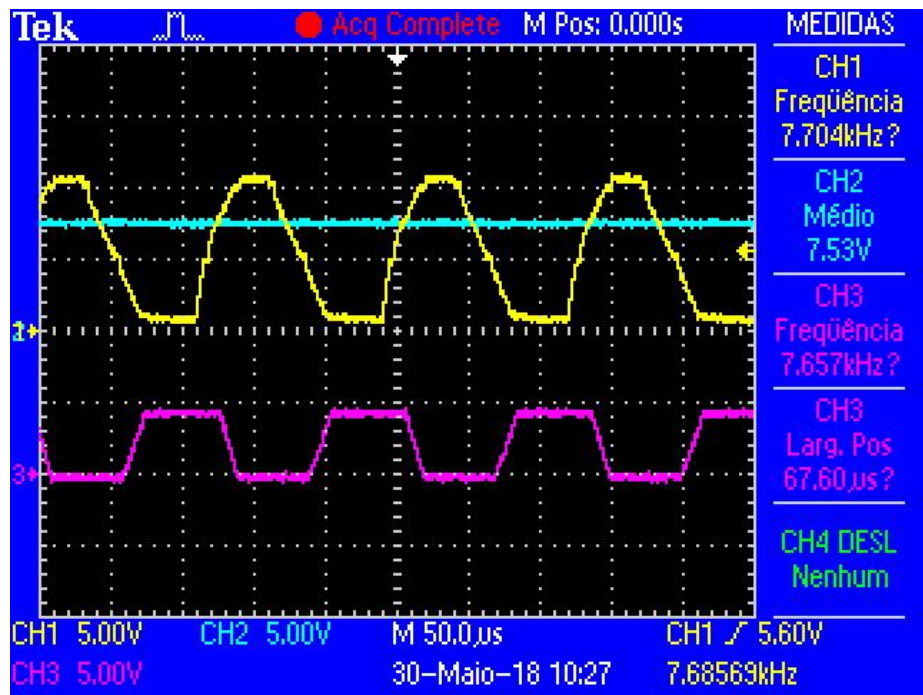
Figura 31 - Software Module Switch Test



Fonte: Autoria própria.

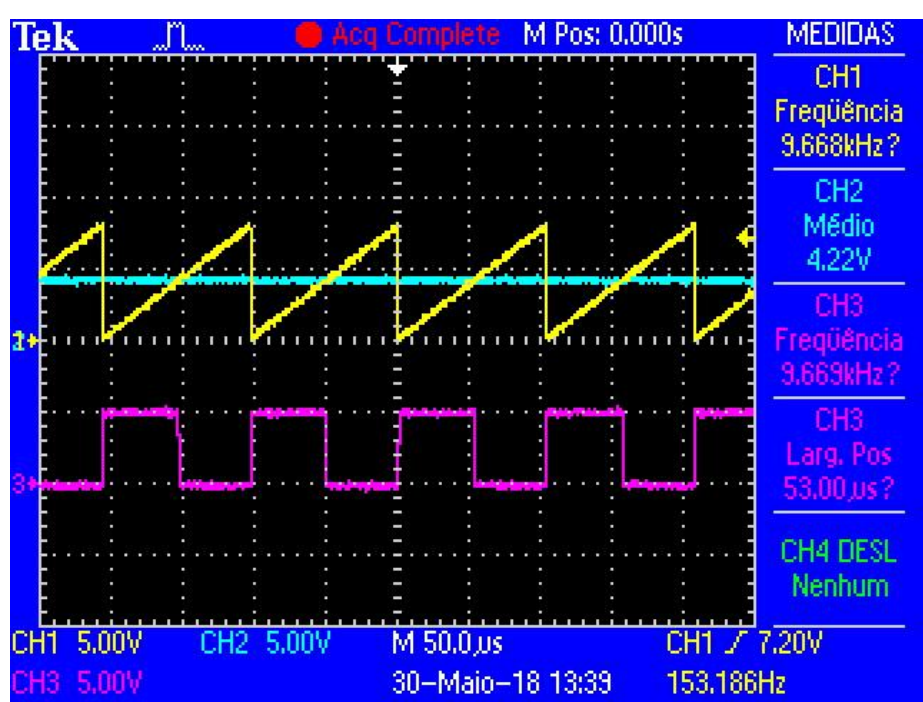
Já o osciloscópio foi utilizado para adquirir os dados referentes a tensão média, largura positiva e frequência do sinal conforme ilustram as figurasFigura 32 eFigura 33 para o circuito antigo e o atual, respectivamente. E a planilha com os dados obtidos pode ser visualizada no Apêndice.

Figura 32 - Geração do sinal PWM com o circuito antigo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - Geração do sinal PWM com o circuito proposto.



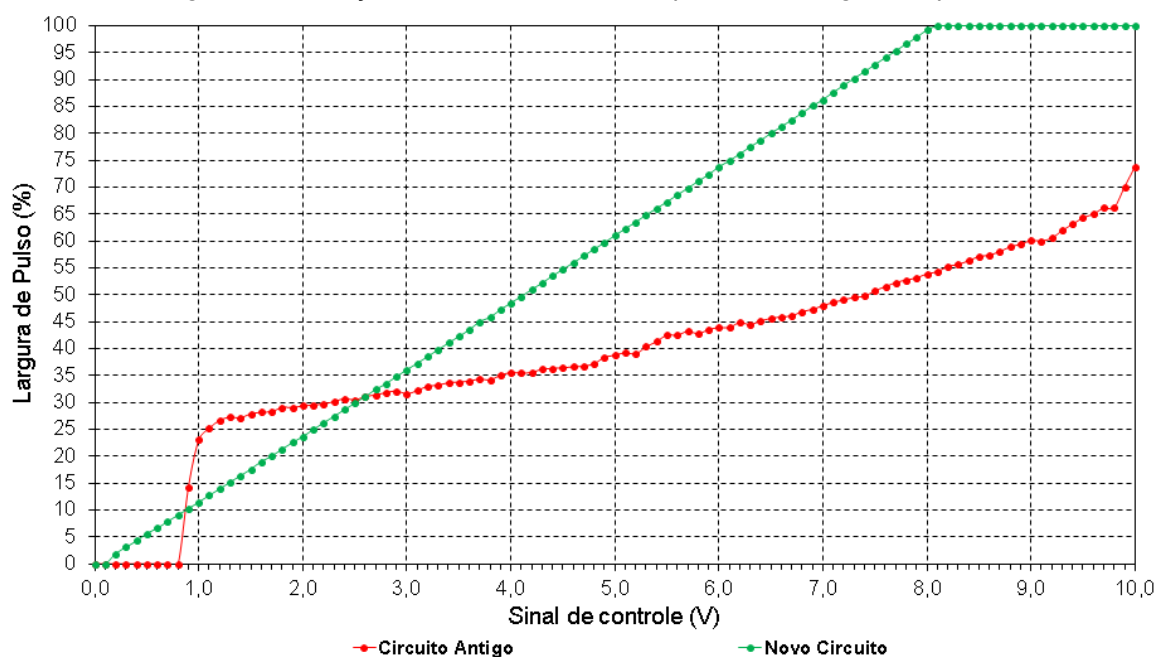
Fonte: Autoria própria.

O resultado obtido após o processamento utilizando o novo circuito, resultou em duas curvas bem distintas, conforme ilustra a Figura 34. Isto se deve principalmente a disparidade entre as ondas triangulares, uma com comportamento linear e a outra com formato irregular.

Como resultado, é possível verificar na Figura 34 que no circuito antigo ilustrado pela curva em vermelho, o sinal somente começa a ser modulado a partir de um sinal de controle de 0,9 V, representando aproximadamente 15% da tensão máxima de alimentação do motor. E é este sinal que é responsável pela comutação entre módulo de medição e furação. Sinais de controles abaixo destes níveis não são interpretados por este circuito. Prosseguindo-se com a análise, verificasse que entre os níveis de 1 a 10 V, o sinal de saída modulado em largura de pulso varia de forma aproximadamente linear com valores entre 25 e 75% da tensão máxima de alimentação. É possível verificar ainda que a onda triangular da Figura 32 apresenta saturação, e isto impedia o circuito atingir o nível máximo em 100% de sinal modulado.

Já os resultados obtidos com o novo circuito ilustrados na curva em verde da Figura 34, são surpreendentes. É possível verificar que ao contrário do circuito anterior, este começa a modular o sinal de saída com aproximadamente 0,2 V de controle. A modulação inicia em aproximadamente 2 % e segue de maneira linear até 100% da tensão máxima de alimentação, aplicando sinais de controle de 0 à 8V.

Figura 34 - Relação entre o nível do sinal aplicado e a largura do pulso.

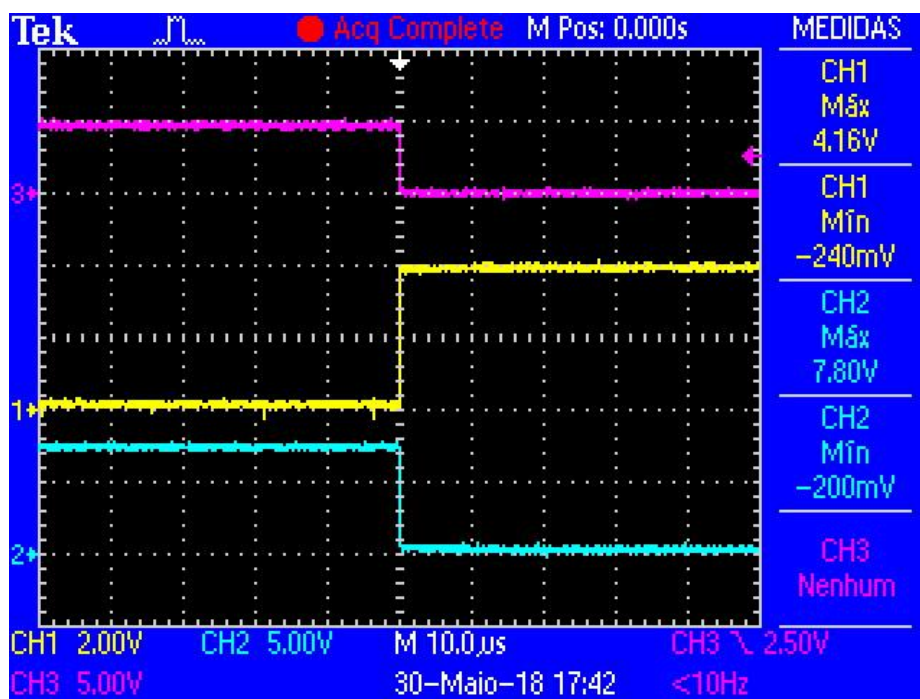


Fonte: Autoria própria.

4.3 RESULTADOS DO CIRCUITO DE INTERTRAVAMENTO

Para validar circuito de intertravamento foram utilizados em conjunto o software, o sistema de medição e o osciloscópio. O resultado do teste durante a ativação é ilustrado na Figura 35. Nesta aquisição o canal 3 representado pela cor rosa, corresponde a uma saída digital e controla a comutação entre as duas iluminações. Já os canais 2 (azul) e 1 (amarelo) correspondem a iluminação LED (desligada) e LASER (ativa), respectivamente.

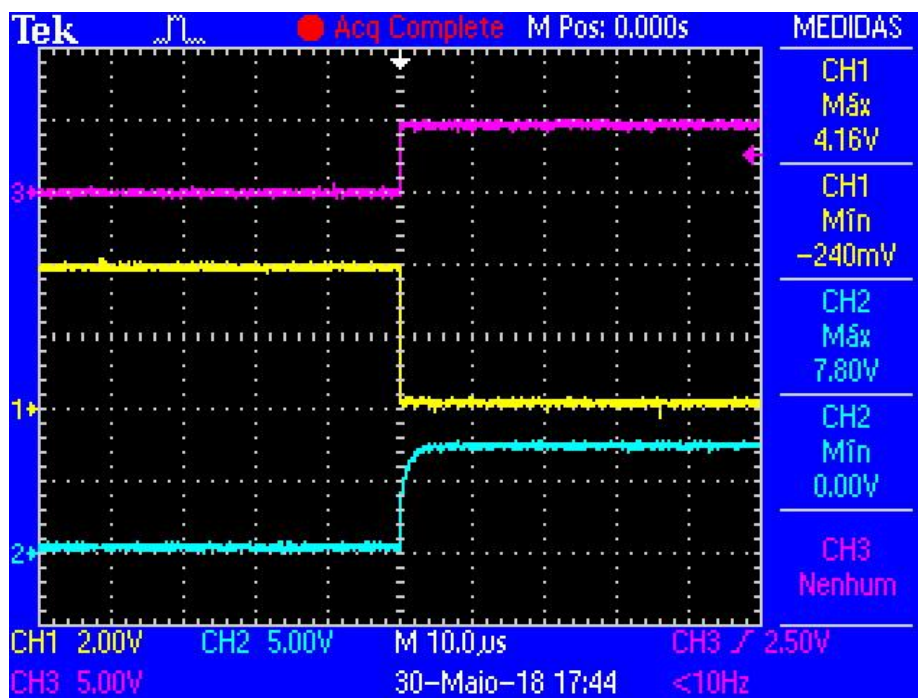
Figura 35 - Intertravamento na ativação: sinal de comando (rosa), laser (amarelo) e LED (azul).



Fonte: Autoria própria.

O resultado oposto é ilustrado na Figura 36, onde o canal 3 altera o seu estado lógico alto para baixo fazendo que ocorra a comutação entre as duas iluminações. A iluminação LED que estava desligada agora passa a estar ligada e a iluminação LASER ativa, agora passa a ser desativada.

Figura 36 - Intertravamento na desativação: sinal de comando (rosa), laser (amarelo) e LED (azul).



Fonte: Autoria própria.

Um ponto importante deste circuito que vale ressaltar, é que ele juntamente com o sinal de ativação do driver de corrente do laser descritos no item 4.1 foram responsáveis pelas melhorias significativas apresentadas.

4.4 RESULTADOS DOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO FURADEIRA

Os resultados dos circuitos de acionamento do motor elétrico da furadeira serão apresentados conforme a subdivisão apresentada no item 3.3.2. Inicialmente serão apresentados os resultados referentes aos circuitos de amostragem da rotação, seguidos pelo condicionamento de sinal de ativação com as rampas de aceleração e desaceleração. Por fim, será a vez dos resultados referentes à sinalização de falhas.

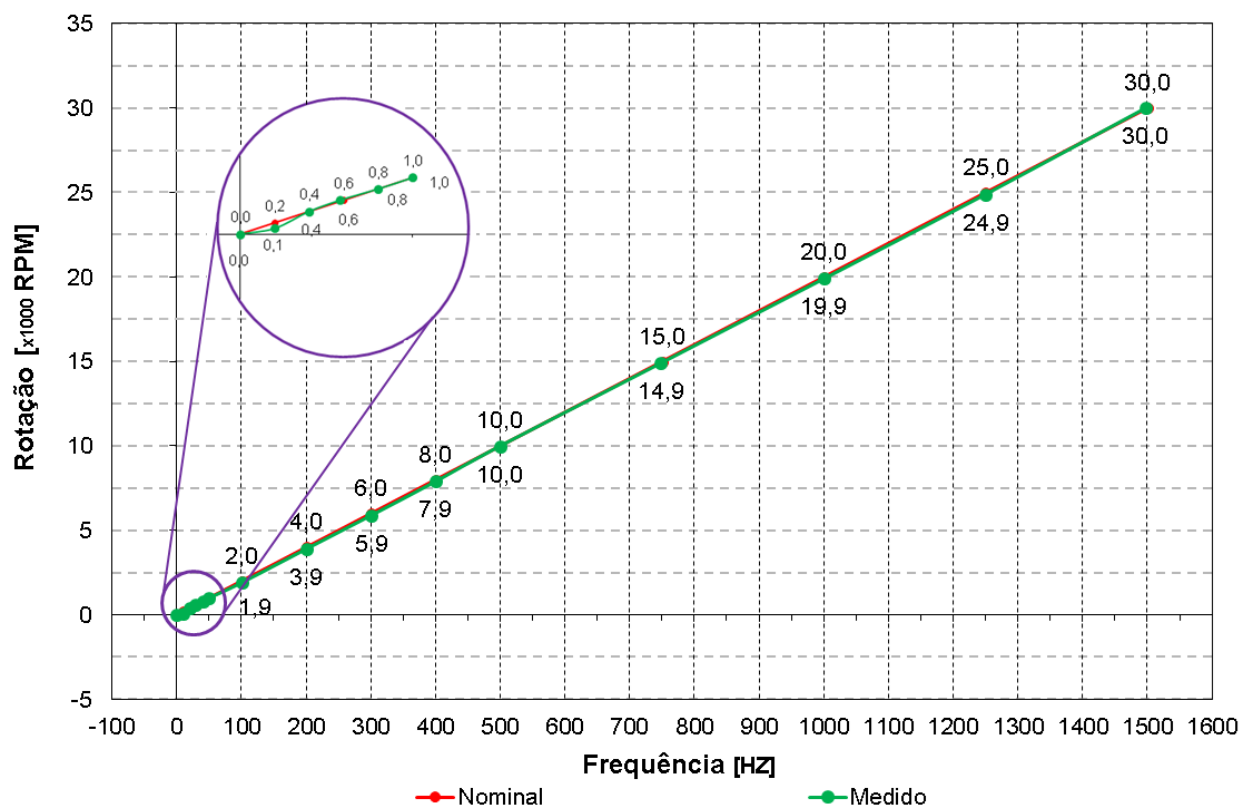
4.4.1 Resultados da exibição da rotação

Para realização deste teste foi necessário varrer a faixa de frequência compreendida entre 0 e 1.500 Hz com a utilização de um gerador de onda, com intuito de simular o sinal de saída do encoder do motor. Já a obtenção dos dados de rotação ocorreu durante a varredura em frequência, onde a cada incremento o valor exibido no mostrador de rotação do sistema foi registrado.

A Figura 37 ilustra a evolução da rotação exibida no display em função da frequência. Onde a curva em verde, que se sobrepõe a vermelha, representa os

valores reais medidos. Já a curva em vermelho representa os valores nominais calculados em função da frequência e da rotação, conforme consta na folha de dados do encoder do motor. Ao analisar as curvas é possível perceber que o valor experimental é similar ao nominal, não ultrapassando em 100 RPM em toda a faixa de amostragem.

Figura 37 - Curva de rotação em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

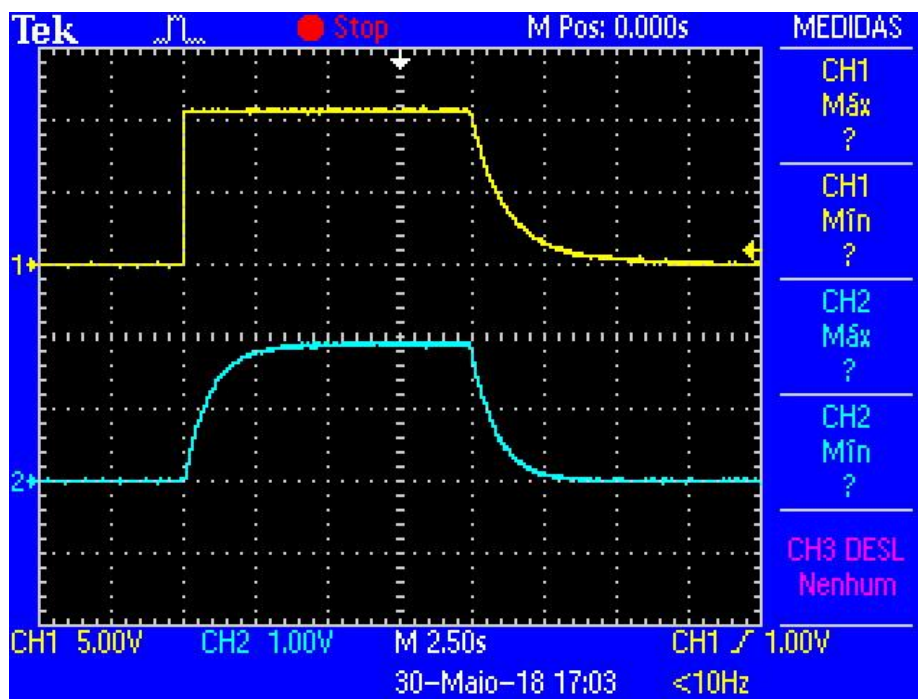
4.4.2 Resultados do sinal de ativação e rampa de aceleração/desaceleração

Conforme mencionado no item 3.3.2.2 durante ativação, a função principal do circuito é promover uma aceleração ou desaceleração gradativa impedindo assim que o motor seja freado abruptamente e possa danificar o conjunto mecânico. Os resultados obtidos com o circuito proposto são ilustrados na Figura 38, onde o canal 1 em amarelo representa o sinal de ativação e canal 2 na cor azul representa a rampa de aceleração e desaceleração.

Analisando a Figura 38 é possível verificar que tanto na comutação de nível lógico de baixo para alto, quanto alto para baixo o tempo da rampa é de aproximadamente 3 s, conforme especificado pela equipe de projeto. E em relação à ativação a alternância de nível ocorre de forma instantânea, permitindo que

controlador inicie também a rampa de forma imediata. Para a desativação existe um *delay* de aproximadamente 7,5 s, justamente para garantir a desaceleração total antes da extinção do sinal de ativação.

Figura 38 - Sinal de ativação e rampa.



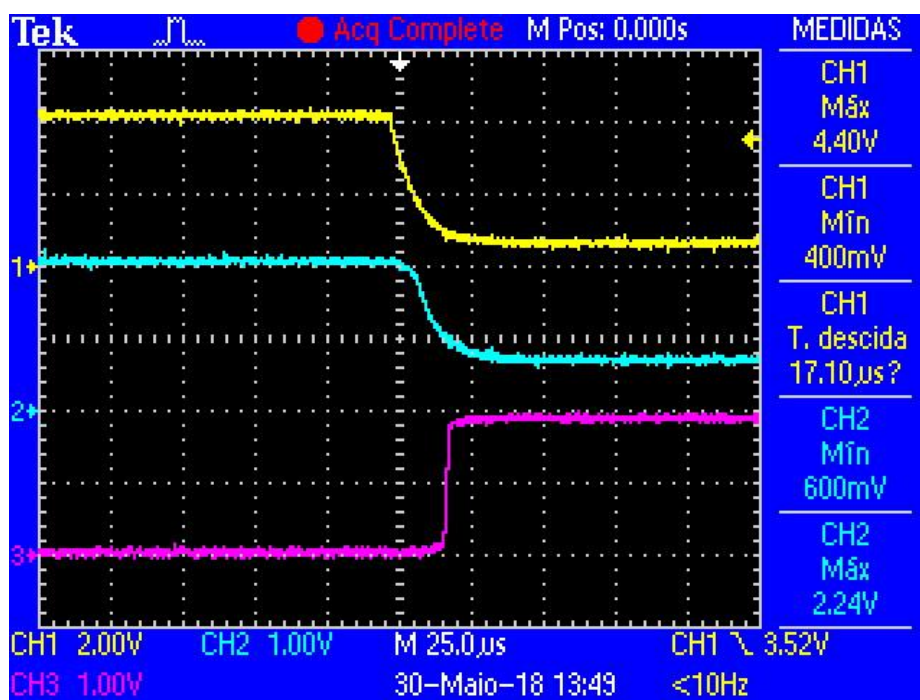
Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Resultados da sinalização de falha no controlador e /ou no motor

Conforme descrito no item 3.3.2.3, o controlador do motor disponibiliza uma saída digital para sinalização de falhas no próprio controlador e/ou motor. A Figura 39 ilustra o resultado do condicionamento de sinal, onde o canal 1 (cor amarela) representa a saída digital do controlador e os canais 2 (azul) e 3 (rosa) representam a polarização do LED bicolor nas cores verde e vermelho, respectivamente.

Analisando a Figura 39 é possível verificar que os canais 1 e 2 estão em fase, isto é, enquanto ao sinal digital do controlador estiver em nível alto o Led permanece aceso com a cor verde e a luz vermelha apagada. Ao ocorrer a mudança de nível a parte verde se apaga e a parte vermelha é ativada sinalizando a falha no gabinete.

Figura 39 - Forma de onda da sinalização de falha.



Fonte: Autoria própria.

4.5 SÍNTESE DO QUARTO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram descritos os testes e resultados obtidos para avaliar os circuitos propostos com o equipamento em sua montagem final. Inicialmente foram apresentados os resultados das melhorias e adequações aplicadas aos circuitos existentes. Na sequência foram descritos os resultados referente a inclusão e integração os novos circuitos.

As alterações referentes ao novo arranjo do driver de corrente do laser em conjunto com o circuito de intertravamento, resultou em um acionamento do tipo degrau, quando comparado com o circuito anterior. A linearidade do circuito modulador de sinal PWM proposto foi superior ao seu antecessor, abrangendo toda a faixa de largura de pulso (0 a 100%).

A comutação entre os diferentes tipos de iluminação ocorreu de maneira eficiente, preservando a iluminação laser ativa quando o sistema está operando de maneira autônoma. De forma similar ao que ocorre com o resultado da modulação em se tratando de linearidade, a exibição de rotação do mostrador é similar ao valor calculado. A rampa apresentou simetria tanto no tempo de aceleração, quanto no tempo de desaceleração trabalhando em conjunto com o sinal de ativação do controlador. Por fim a sinalização de falha apresentou coerência entre a sinalização

verde e vermelha, quando em condições normais de funcionamento e/ou falha, respectivamente.

A realização dos testes com os circuitos foi importante para a validação do sistema, tornando-o apto para sua utilização em campo e laboratório. Todos os testes de funcionamento foram realizados com sucesso. Os circuitos foram aprovados sem exceção, atingindo assim todas as expectativas.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do recente crescimento do segmento de exploração e produção de petróleo e gás no Brasil e a demanda crescente da indústria do petróleo e gás por equipamentos de inspeção, surgiu a necessidade de aprimorar o equipamento de medições de tensão residual e os procedimentos existentes incrementando sua robustez para aplicações fora de um ambiente controlado de laboratório. Neste contexto, o presente trabalho propôs implementação de melhorias nos circuitos eletroeletrônicos existentes no hardware atual do sistema de medição de tensões residuais.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam que as alterações referentes ao novo arranjo do driver de corrente do laser, em conjunto com o circuito de intertravamento resultou em um acionamento do tipo degrau. Reduzindo de 50 μ s para 1 μ s o tempo de resposta na ativação e de 80 ms para 6 μ s na desativação. Isto representa uma melhoria significativa no tempo de estabilização, aproximadamente 50 e 13000 vezes para a ativação e desativação respectivamente.

O sinal modulado em largura de pulso obtido na saída do comparador, também foi outra grande surpresa. A linearidade do circuito em modular o sinal PWM foi superior ao seu antecessor. Os parâmetros de avaliação mostraram que o sinal pôde ser modulado de 2 a 100%, enquanto que o valor mínimo para o circuito anterior foi de 15% não ultrapassando o valor máximo de 75% do sinal de alimentação.

O circuito de intertravamento, além de contribuir para ativação do LASER funcionou conforme o esperado, intercalando entre os diferentes tipos de iluminação. Seu papel fundamental foi promover a comutação de maneira eficiente, preservando a iluminação do laser ativa sempre que o sistema operar de forma autônoma.

Na avaliação do circuito de exibição a utilização do gerador de onda foi de fundamental importância na varredura da frequência compreendida entre 0 e 1500 Hz. Funcionando de forma bastante similar ao que ocorreu com o resultado da modulação, em se tratando de linearidade, o valor de rotação exibido no mostrador foi bastante similar ao valor calculado. Não apresentando uma diferença superior a 100 RPM, entre o valor exibido e o valor calculado.

Conforme mencionado, a função principal do circuito de ativação e rampa é promover uma aceleração ou desaceleração gradativa impedindo principalmente a frenagem abrupta do motor. Os resultados obtidos com este circuito obedeceram aos critérios de tempo para rampa pré-estabelecido, aproximadamente 3 s. Já em relação à ativação, ocorreu a alternância de forma instantânea permitindo que controlador inicie também a rampa de forma imediata. Na desativação existe um *delay* justamente para garantir a desaceleração total antes da extinção do sinal de ativação.

A avaliação da sinalização de falha apresentou coerência entre as sinalizações. A sinalização verde ocorreu quando o sistema operou em condições normais de funcionamento e vermelha em caso de falhas, permitindo ao usuário interromper o ensaio se necessário.

Contudo, a realização dos testes com os circuitos foi importante para a validação do sistema tornando-o apto para sua utilização em campo e laboratório. Todos os testes de funcionamento apresentaram resultados positivos. Consequentemente, os circuitos foram aprovados sem exceção, atingindo assim todas as expectativas.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os circuitos implementados se mostraram bastantes promissores para o sistema de medição de tensões residuais com a utilização da furadeira elétrica. Entretanto, estudos a respeito do funcionamento do equipamento e seu comportamento em relação ao acionamento elétrico do novo cabeçote de furação devem ser melhor analisados. Para isso, os seguintes tópicos são sugeridos como recomendações para trabalhos futuros:

- Submeter o módulo de furação a rampa de acionamento proposta e comparar com o acionamento via rampa linear a ser implementado, visando melhorias futuras;
- Integrar os circuitos utilizados da placa de desenvolvimento com os circuitos da placa de expansão, promovendo uma interface única para acionamento do motor elétrico de furação.

REFERÊNCIAS

- [1] CORRER, C. J., et al. **Aplicação “IN SITU” de surfactantes em solo contaminado com petróleo e tratamento da água residual com agente oxidante.** In: 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (4º PDPETRO). Brasil. oct. 2007. p. 1-10.
- [2] ROITMAN, M., PHILIPPI, A. **Proposta de um sistema de gestão ambiental para o porto de Santos**, In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil. dec. 2000. p. 1-9.
- [3] M. T. Flaman. **“Brief investigation of induced drilling stresses in the centre-hole method of residual-stress measurement,”** Exp. Mech. 22, 26-30 1982.
- [4] ASTM E837. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.** West Conshohocken, 2014.
- [5] VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. **Compact sensor combining DSPI and the hole-drilling technique to measure nonuniform residual stress fields.** Bellingham: SPIE, Spain, 2014.
- [6] KAPP, W. A. **Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para medição de deslocamentos, deformações, tensões mecânicas e tensões residuais mecânicas.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
- [7] VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI JR., A. **Robust Speckle Metrology.** Bellingham: SPIE, 2014.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS. **DAQ M Series - NI USB-621x User Manual.** Austin, Texas. 2009.
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. **LM555 precision timer datasheet.** Dallas, Texas. 2015
- [10] WAVELENGTH ELECTRONICS, INC. **FL500 SMT driver for laser diodes Datasheet.** Bozeman, Montana. 2015.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. **OPA445 High Voltage FET-Input Operational Amplifier Datasheet.** Dallas, Texas. 2008.
- [12] ON SEMICONDUCTOR. **MC34063 1.5 A, Step-Up/Down/ Inverting Switching Regulators Datasheet.** Aurora, Colorado. 2003.
- [13] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **BC547 NPN Epitaxial Silicon Transistor Datasheet.** Sunnyvale, Califórnia. 2002.

- [14] OMRON CORPORATION. **G5CLE-14DC12 PCB Power Relay Cubic, Single-pole 10A Datasheet**. Shimogyo-ku, Kyoto. 2007
- [15] ST MICROELECTRONICS. **L298 Dual Full Bridge Driver Datasheet**. Genebra, 2000.
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. **LM324 Low-Power, Quad-Operational Amplifiers Datasheet**. Dallas, Texas. 2015.
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. **LM311 Differential Comparators Datasheet**. Dallas, Texas. 2017
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. **74HC14 Hex Schmitt-Trigger Inverters Datasheet**. Dallas, Texas. 2016.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. **SN74LS51 And-Or-Invert Gates Datasheet**. Dallas, Texas. 1988.
- [20] ON SEMICONDUCTOR. **BC337 Amplifier Transistors NPN Silicon Datasheet**. Aurora, Colorado. 2013.
- [21] MAXON MOTOR. **Maxon Motor EC22 Ø22 mm, brushless, 40 Watt, with Hall sensors datasheet**. Swiss, 2017
- [22] MAXON MOTOR. **Maxon Motor Control 1-Q-EC Amplifier DEC Module 50/5 Datasheet**. Swiss, 2015.
- [23] MAXON MOTOR. **DEC Module Evaluation Board Datasheet**. Swiss, 2015
- [24] MAXON MOTOR. **Products & Shop**. Disponível em: <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/product-overview>. Acesso em: 20/02/2018.
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. **LM331 Precision Voltage-to-Frequency Converters Datasheet**. Dallas, Texas. 2015
- [26] INTERSIL CORPORATION. **ICL7107 3^{1/2} Digit, LCD/LED Display, A/D Converter Datasheet**. Milpitas, Califórnia. 2014
- [27] INTERSIL CORPORATION. **ICL7660 CMOS Voltage Converters Datasheet**. Milpitas, Califórnia. 2010
- [28] TEXAS INSTRUMENTS. **LM358 Low-Power, Dual-Operational Amplifiers Datasheet**. Dallas, Texas. 2014.
- [29] LABCENTER. **Proteus Design Suite, versão 7.1**. Labcenter Eletronics, 2011. Pacote de softwares de simulação de circuitos e layout de PCs.

APÊNDICE A

Nesta tabela são apresentados os dados adquiridos do percentual da largura de pulso na saída (Duty Cycle) em função da tensão analógica de entrada, mostrados na Figura 34.

Tabela 1- Dados da Modulação de sinal PWM.

Circuito Antigo					Circuito Novo				
TA [V]	TM [V]	LP [µs]	f [Hz]	DC [%]	TA [V]	TM [V]	LP [µs]	f [Hz]	DC [%]
0,0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00
0,1	0,12	0,00	0,000	0,00	0,11	0,00	0,000	0,000	0,00
0,2	0,22	0,00	0,000	0,00	0,21	2,15	8,958	1,92	
0,3	0,32	0,00	0,000	0,00	0,30	3,52	8,943	3,15	
0,4	0,42	0,00	0,000	0,00	0,41	4,80	8,927	4,28	
0,5	0,53	0,00	0,000	0,00	0,50	5,97	9,509	5,68	
0,6	0,62	0,00	0,000	0,00	0,61	7,45	8,924	6,65	
0,7	0,72	0,00	0,000	0,00	0,71	8,87	8,882	7,88	
0,8	0,83	0,00	0,000	0,00	0,81	10,24	8,897	9,11	
0,9	0,93	18,60	7,663	14,25	0,91	11,59	8,890	10,30	
1,0	1,01	30,00	7,698	23,09	1,01	12,88	8,924	11,49	
1,1	1,13	32,80	7,680	25,19	1,11	14,30	8,921	12,76	
1,2	1,23	34,80	7,680	26,73	1,21	15,61	8,936	13,95	
1,3	1,34	35,60	7,657	27,26	1,31	17,02	8,941	15,22	
1,4	1,44	35,40	7,675	27,17	1,42	18,33	8,939	16,39	
1,5	1,54	36,40	7,669	27,92	1,52	19,72	8,939	17,63	
1,6	1,63	36,70	7,680	28,19	1,62	21,25	8,958	19,04	
1,7	1,73	36,90	7,675	28,32	1,71	22,36	8,958	20,03	
1,8	1,83	37,80	7,692	29,08	1,81	23,79	8,978	21,36	
1,9	1,92	38,00	7,657	29,10	1,90	25,17	8,962	22,56	
2,0	2,02	38,30	7,669	29,37	2,00	26,36	8,989	23,70	
2,1	2,13	38,50	7,680	29,57	2,10	27,84	8,975	24,99	
2,2	2,23	38,60	7,704	29,74	2,21	29,20	8,984	26,23	
2,3	2,34	39,27	7,688	30,19	2,32	30,58	8,975	27,45	
2,4	2,44	39,90	7,698	30,72	2,42	31,90	8,990	28,68	
2,5	2,54	39,60	7,704	30,51	2,52	33,24	8,991	29,89	
2,6	2,65	40,50	7,680	31,10	2,62	34,72	8,966	31,13	
2,7	2,75	40,80	7,704	31,43	2,73	36,17	8,964	32,42	
2,8	2,85	41,40	7,692	31,84	2,83	37,40	8,961	33,51	
2,9	2,96	41,80	7,692	32,15	2,94	38,81	8,977	34,84	
3,0	3,06	41,20	7,675	31,62	3,04	40,12	9,000	36,11	
3,1	3,17	41,80	7,716	32,25	3,14	41,40	9,009	37,30	
3,2	3,26	43,20	7,645	33,03	3,24	42,69	9,031	38,55	
3,3	3,36	43,40	7,657	33,23	3,34	44,04	9,042	39,82	
3,4	3,46	44,00	7,657	33,69	3,43	45,37	9,052	41,07	
3,5	3,54	44,00	7,680	33,79	3,53	46,67	9,061	42,29	
3,6	3,64	44,30	7,675	34,00	3,62	47,97	9,074	43,53	
3,7	3,74	44,80	7,669	34,36	3,71	49,65	9,065	45,01	
3,8	3,84	44,70	7,657	34,23	3,81	50,72	9,042	45,86	
3,9	3,94	45,60	7,692	35,08	3,91	52,39	9,022	47,27	
4,0	4,04	46,40	7,669	35,58	4,01	53,71	9,034	48,52	
4,1	4,14	46,10	7,692	35,46	4,12	55,08	9,026	49,72	
4,2	4,24	46,00	7,740	35,60	4,22	56,49	9,026	50,99	
4,3	4,34	47,50	7,622	36,20	4,32	58,07	8,992	52,22	
4,4	4,45	47,20	7,698	36,33	4,42	59,38	9,011	53,51	
4,5	4,55	47,40	7,692	36,46	4,53	60,79	9,008	54,76	
4,6	4,66	47,80	7,669	36,66	4,63	62,00	9,028	55,97	
4,7	4,77	48,00	7,657	36,75	4,74	63,40	9,030	57,25	
4,8	4,87	48,60	7,657	37,21	4,84	64,68	9,043	58,49	
4,9	4,97	49,90	7,698	38,41	4,94	65,90	9,061	59,71	
5,0	5,07	50,50	7,680	38,78	5,04	67,37	9,061	61,04	

Circuito Antigo					Circuito Novo				
TA [V]	TM [V]	LP [µs]	f [Hz]	DC [%]	TA [V]	TM [V]	LP [µs]	f [Hz]	DC [%]
5,1	5,17	51,20	7,669	39,27	5,14	68,69	9,071	62,31	
5,2	5,26	51,00	7,657	39,05	5,23	70,06	9,068	63,53	
5,3	5,35	52,40	7,704	40,37	5,32	71,43	9,081	64,87	
5,4	5,45	53,80	7,680	41,32	5,43	72,80	9,073	66,05	
5,5	5,54	55,40	7,680	42,55	5,52	74,35	9,052	67,30	
5,6	5,65	55,40	7,669	42,49	5,62	75,65	9,063	68,56	
5,7	5,75	56,40	7,669	43,25	5,72	76,90	9,083	69,85	
5,8	5,86	55,80	7,669	42,79	5,83	78,17	9,097	71,11	
5,9	5,96	56,60	7,692	43,54	5,93	79,43	9,107	72,34	
6,0	6,06	57,40	7,657	43,95	6,03	80,76	9,139	73,81	
6,1	6,17	57,20	7,680	43,93	6,13	82,32	9,100	74,91	
6,2	6,27	58,80	7,634	44,89	6,24	83,59	9,115	76,19	
6,3	6,37	58,00	7,669	44,48	6,34	84,93	9,126	77,51	
6,4	6,47	59,00	7,657	45,18	6,44	86,23	9,126	78,69	
6,5	6,57	59,53	7,669	45,65	6,54	87,55	9,143	80,05	
6,6	6,66	59,40	7,728	45,90	6,63	88,92	9,138	81,26	
6,7	6,76	60,07	7,677	46,12	6,73	90,29	9,141	82,53	
6,8	6,85	60,80	7,716	46,91	6,82	91,48	9,159	83,79	
6,9	6,95	61,60	7,680	47,31	6,91	92,94	9,158	85,11	
7,0	7,05	63,00	7,622	48,02	7,02	94,05	9,174	86,28	
7,1	7,15	63,50	7,657	48,62	7,12	95,51	9,179	87,67	
7,2	7,25	63,80	7,692	49,07	7,22	96,87	9,182	88,95	
7,3	7,35	64,40	7,692	49,54	7,32	95,20	9,481	90,26	
7,4	7,46	64,80	7,680	49,77	7,42	99,51	9,191	91,46	
7,5	7,56	66,00	7,692	50,77	7,52	100,90	9,197	92,80	
7,6	7,66	67,20	7,669	51,54	7,63	102,20	9,206	94,09	
7,7	7,77	68,20	7,669	52,30	7,73	103,60	9,205	95,36	
7,8	7,87	68,40	7,716	52,78	7,83	104,90	9,210	96,61	
7,9	7,97	69,00	7,704	53,16	7,94	106,30	9,204	97,84	
8,0	8,07	70,00	7,704	53,93	8,04	107,80	9,205	99,23	
8,1	8,17	70,60	7,692	54,31	8,14	-	-	100,00	
8,2	8,27	72,20	7,657	55,28	8,24	-	-	100,00	
8,3	8,37	72,80	7,645	55,66	8,34	-	-	100,00	
8,4	8,47	73,40	7,678	56,36	8,44	-	-	100,00	
8,5	8,57	74,60	7,657	57,12	8,54	-	-	100,00	
8,6	8,67	74,90	7,663	57,40	8,64	-	-	100,00	
8,7	8,77	75,60	7,680	58,06	8,74	-	-	100,00	
8,8	8,88	76,90	7,663	58,93	8,84	-	-	100,00	
8,9	8,98	77,60	7,657	59,42	8,95	-	-	100,00	
9,0	9,08	78,00	7,704	60,09	9,04	-	-	100,00	
9,1	9,18	78,40	7,657	60,03	9,15	-	-	100,00	
9,2	9,28	79,00	7,663	60,54	9,25	-	-	100,00	
9,3	9,39	80,80	7,669	61,97	9,35	-	-	100,00	
9,4	9,49	82,20	7,680	63,13	9,45	-	-	100,00	
9,5	9,59	84,00	7,657	64,32	9,56	-	-	100,00	
9,6	9,69	84,40	7,704	65,02	9,65	-	-	100,00	
9,7	9,79	86,20	7,675	66,16	9,76	-	-	100,00	
9,8	9,89	86,60	7,650	66,25	9,85	-	-	100,00	
9,9	9,99	91,20	7,686	70,10	9,96	-	-	100,00	
10,0	10,10	96,20	7,675	73,83	10,10	-	-	100,00	

Legenda

TA	Tensão Aplicada
TM	Tensão Média
LP	Largura Positiva
f	Frequência
DC	Duty Cycle