



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Controle de Oxigênio Dissolvido em Reator Químico para
Tratamento de Efluentes Usando um Novo Circuito de Disparo de
TRIAC**

Ryan Carlos Vilela Silveira Maia

Campo Grande - MS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Controle de Oxigênio Dissolvido em Reator Químico para
Tratamento de Efluentes Usando um Novo Circuito de Disparo de
TRIAC**

Ryan Carlos Vilela Silveira Maia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
– UFMS.

Orientador: Profº Dr. Raymundo Cordero Garcia

Campo Grande - MS
2024

Controle de Oxigênio Dissolvido em Reator Químico para Tratamento de Efluentes Usando um Novo Circuito de Disparo de TRIAC

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Raymundo Cordero Garcia
Orientador

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Prof. Dra. Rebeca Yndira Cabrera Padilla

Campo Grande - MS
2024

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Eu, Ryan Carlos Vilela Silveira Maia, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado, com o título “**Controle de Oxigênio Dissolvido em Reator Químico para Tratamento de Efluentes Usando um Novo Circuito de Disparo de TRIAC**” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Ryan Carlos Vilela Silveira Maia

“A mais persuasiva demonstração da existência de Deus depreende-se da evidente harmonia daqueles meios que asseguram a ordem do universo e pelos quais os seres vivos encontram no seu organismo tudo aquilo de que precisam para a sua subsistência, a sua reprodução e o desenvolvimento das suas virtualidades físicas e espirituais”
(André Marie Ampère).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raymundo Cordero Garcia, pelo suporte técnico e pedagógico durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família pelo suporte emocional e, em especial, ao meu pai Rones Vilela, por todo o apoio e investimento durante a minha trajetória pessoal e profissional, além de ser a maior das minhas inspirações ao se tratar de ética, honestidade e resiliência.

À Sandy Micaela Ruiz pelos conselhos e pelo companheirismo durante toda a minha graduação.

Ao meu irmão Renan Vilela pelo auxílio técnico durante toda a estruturação deste trabalho.

A todos os mestres docentes que me agraciaram com seus sábios ensinamentos durante a minha formação profissional.

RESUMO

Com o avanço tecnológico e a evolução dos processos industriais, surgiu-se a necessidade da busca por métodos sustentáveis que mitiguem os danos causados ao meio ambiente, geralmente oriundos dessas mesmas indústrias. Sistemas voltados para o tratamento de efluentes é um grande exemplo disso. Ademais, a utilização de micro-organismos vivos para esse fim tem sido alvo de estudo em diversas pesquisas. Dito isso, para esse método de tratamento, torna-se necessária a manutenção de um ambiente que mantenha as condições vitais desses seres vivos. Dentre essas circunstâncias, destaca-se o controle da taxa de oxigênio dissolvido no interior dos reatores, uma vez que, organismos aeróbios necessitam do consumo de oxigênio para a sua sobrevivência. Sendo assim, a realização da aferição, do processamento e da gestão desses parâmetros de forma automática, certamente torna o sistema mais vantajoso em relação a métodos manuais, já que, possibilitam um monitoramento contínuo e um controle mais preciso, reduzindo a margem de erro e garantindo que as condições ideais para a sobrevivência dos micro-organismos sejam mantidas. Portanto, objetiva-se projetar, simular e confeccionar um sistema conversor de tensão, aplicando metodologias práticas descritas pela eletrônica analógica e de potência, que, em conjunto com um sensoriamento adequado e um processamento de dados realizados através de um Arduino Uno, possua a capacidade de automatizar todo o controle de oxigênio dissolvido em fluido no interior do reator químico de maneira eficiente e economicamente acessível. Ademais, utiliza-se como método de análise e simulação de circuitos elétricos, o software Proteus 8 Professional, enquanto que, para a confecção do controlador, faz-se o uso somente de componentes eletrônicos comuns e de fácil manipulação, combinados em uma placa de circuito impresso trilhada em cobre. Destarte, visando atender a outras variadas aplicações, todo o produto final desenvolvido, juntamente com sua metodologia de uso, pode ser aproveitado posteriormente em qualquer planta instrumental que possibilite o controle de seus equipamentos com base na variação de tensão alternada eficaz na carga, em função de um sensoriamento digital ou analógico de seus parâmetros.

Palavras-Chave: Arduino, automática, controlador, conversor, eletrônica, micro-organismos, oxigênio.

ABSTRACT

With technological advancement and the evolution of industrial processes, there was a need to search for sustainable methods that mitigate the damage caused to the environment, generally originating from these same industries. Systems aimed at treating effluents are a great example of this. Furthermore, the use of live microorganisms for this purpose has been studied in several studies. That said, for this treatment method, it is necessary to maintain an environment that maintains the vital conditions of these living beings. Among these circumstances, the control of the dissolved oxygen rate inside the reactors stands out, since aerobic organisms need the consumption of oxygen for their survival. Therefore, measuring, processing and managing these parameters automatically certainly makes the system more advantageous in relation to manual methods, as they enable continuous monitoring and more precise control, reducing the margin of error and ensuring that ideal conditions for the survival of microorganisms are maintained. Therefore, the objective is to design, simulate and manufacture a voltage converter system, applying practical methodologies described by analog and power electronics, which, together with adequate sensing and data processing carried out through an Arduino Uno, has the capacity to automate all control of oxygen dissolved in fluid inside the chemical reactor in an efficient and economically accessible manner. Furthermore, the Proteus 8 Professional software is used as a method of analysis and simulation of electrical circuits, while, to manufacture the controller, only common and easy-to-handle electronic components are used, combined on a board. printed circuit printed in copper. Therefore, aiming to meet other varied applications, the entire final product developed, together with its usage methodology, can be used later in any instrumental plant that allows the control of its equipment based on the effective alternating voltage variation in the load, depending on of digital or analogue sensing of its parameters.

Keywords: Arduino Uno, automatically, controller, converter, electronics, microorganisms, oxygen.

LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Figura 1 — Esquemático do circuito <i>Zero Cross</i> utilizando um Arduino.	16
Figura 2 — Esquemático do circuito de controle utilizando um TRIAC.	16
Figura 3 — Arduino IDE.	20
Figura 4 — Arduino UNO.....	21
Figura 5 — Sensor DO.	24
Figura 6 — Representação de um circuito retificador de onda completa.	25
Figura 7 — Representação esquemática do interior de um optoacoplador com fototransistor.	26
Figura 8 — Circuito interno do CI NE555N.	28
Figura 9 — Disposição do CI NE555N como modo de operação astável.	30
Figura 10 — Ondas geradas pelo CI NE555N no modo de operação astável.	31
Figura 11 — Disposição do CI NE555N como modo de operação monoestável.	32
Figura 12 — Ondas geradas pelo CI NE555N no modo de operação monoestável.	33
Figura 13 — Modulação PWM.	35
Figura 14 — Esquemático de um circuito <i>Zero Cross</i> utilizando Arduino.	36
Figura 15 — Esquemático de ligação do MOC3021.	38
Figura 16 — Esquemático do TRIAC.	39
Figura 17 — Esquemático da composição interna do TRIAC.	40
Figura 18 — Curva característica de um TRIAC.	41
Figura 19 — Quadrante dos modos de disparo do TRIAC.	42
Figura 20 — Circuito simplificado de um conversor CA-CA.	43
Figura 21 — Ondas de tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) utilizando um conversor CA-CA.	44
Figura 22 — Diagrama de blocos do sistema de controle.	46
Figura 23 — Diagrama de conexão entre o sensor DO e o Arduino Uno.	47
Figura 24 — Código de programação para envio de sinal de referência.	48
Figura 25 — Circuito de Sincronismo.	49
Figura 26 — Circuito Gerador de Onda PWM.	51
Figura 27 — Circuito de acionamento do conversor CA-CA.	54
Figura 28 — Diagrama completo do conversor CA-CA.	55

Figura 29 — Ondas de tensão na entrada (em amarelo) e retificada (em azul) obtidas na simulação.	55
Figura 30 — Onda de tensão retificada (em azul) e pulsos de sincronismo (em rosa) obtidos na simulação.	56
Figura 31 — Pulso de sincronismo (verde), onda triangular (rosa) e tensão de referência (azul).	57
Figura 32 — Onda PWM (amarelo), onda triangular (rosa) e tensão de referência (azul). ..	57
Figura 33 — Onda PWM (amarelo), onda PWM invertida (azul).	58
Figura 34 — Onda de tensão na carga (amarelo) e gatilho de acionamento (azul).	58
Figura 35 — Ilustração dos circuitos da placa realizada através do Microsoft Visio.	60
Figura 36 – Placa eletrônica confeccionada.	60
Figura 37 – Produto final do conversor CA-CA confeccionado.	61
Figura 38 – Compressor de ar Risheng RS-2800.	61
Figura 39 – Sensor DO em atuação.	62
Figura 40 – Sistema de controle completo.	62
Figura 41 – Resultados das ondas PWM capturados pelo osciloscópio.	63
Figura 42 – Resultados da onda de tensão na carga capturados pelo osciloscópio.	63
Figura 43 — Tensão eficaz na carga (V) x Gráfico da relação entre Ângulo de disparo (°). ..	67

LISTA DE TABELAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Tabela 1 – Dados técnicos essenciais do sensor DO.	24
Tabela 2 – Condições de operação da ponte retificadora monofásica RS207 a 25° C.	25
Tabela 3 – Valores máximos de operação do optoacoplador PC817 a 25° C.	27
Tabela 4 – Pinagem do CI NE555N.	28
Tabela 5 – Valores máximos de operação do optoTRIAC MOC3021 a 25° C.	38
Tabela 6 – Resultados experimentais do conversor CA-CA.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DO	<i>Dissolved Oxygen</i>
GND	<i>Ground</i> (ponto de referência no sistema eletrônico)
I	Intensidade de corrente elétrica
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
P	Potência elétrica
R	Resistência elétrica
Vcc	Volts (em corrente contínua)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Tratamento de Efluentes	14
1.2	Objetivos Gerais e Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	Arduino UNO.....	20
2.2	Sensor DO.....	23
2.3	Ponte Retificadora Monofásica (RS207).....	24
2.4	Optoacoplador (PC817).....	26
2.5	CI NE555N.....	27
2.5.1	Modo de Operação Astável.....	29
2.5.2	Modo de Operação Monoestável.....	32
2.6	Modulação PWM.....	34
2.7	Circuito Detector de Cruzamento por Zero (Zero Cross).....	36
2.8	OptoTRIAC (MOC3021).....	37
2.9	TRIAC.....	39
3	SISTEMA PROPOSTO.....	45
3.1	Leitura e Interpretação de Dados	46
3.2	Circuito de Sincronismo	59
3.3	Circuito Gerador de Onda PWM	51
3.4	Circuito de Acionamento do Conversor CA-CA.....	53
4	RESULTADOS.....	55
4.1	Simulação.....	55
4.1.1	Circuito de Sincronismo.....	55
4.1.2	Circuito Gerador de Onda PWM.....	57
4.1.3	Circuito de Acionamento do Conversor CA-CA.....	58
4.2	Montagem.....	59
5	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A — Códigos de programação do sensor DO no Arduino IDE.....	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tratamento de Efluentes

Sabe-se que, com o avanço contínuo da tecnologia e das demandas industriais, surgem-se também grandes desafios em relação à preservação ambiental e, em especial, ao descarte adequado de resíduos prejudiciais ao meio ambiente, como efluentes. Já que, estes subprodutos líquidos oriundos das industriais, quando liberados sem o tratamento adequado, podem se tornar uma significativa ameaça à qualidade de água local e a todo o ecossistema aquático que houver tido contato com os fluidos (Tera Ambiental, 2021).

Em meio a essa realidade, a busca por métodos sustentáveis voltados para o tratamento desses efluentes tornou-se uma pauta importante por parte das agências governamentais e científicas, tendo em vista os impactos da atividade humana na mudança climática global (Agência Nacional de Águas, 2024).

Ademais, dentre as pesquisas desenvolvidas para esse fim, destaca-se como foco de estudo em alguns centros de pesquisa e universidades, a utilização de micro-organismos vivos para tratamento, decompondo a matéria orgânica presente nos efluentes. Neste cenário, os seres aeróbios são mantidos submersos em um reator químico cujas condições vitais dos mesmos são preservadas sob total controle, já que a manutenção de tais parâmetros deve ser bastante precisa, tendo em vista a alta sensibilidade desses organismos a pequenas variações físicas e químicas em seu ambiente (Garcia, *et. al.*, 2023).

De acordo com Branco (1976), a digestão aeróbia se trata de um processo bioquímico de oxidação em que microrganismos utilizam o oxigênio como produto na reação para degradar a matéria orgânica e obter energia. Este tipo de processo é efetuado em reatores aeróbios. Quando aplicado ao tratamento de efluentes, é necessário monitorar e controlar continuamente os parâmetros que afetam diretamente o processo, como pH, oxigênio dissolvido e temperatura, a fim de garantir a eficiência da degradação (Von Sperling; Chenicharo, 2005).

Entre todos os parâmetros a controlar em um reator aeróbio, tem-se o controle de oxigênio dissolvido. O controle deste parâmetro é importante porque os microrganismos, como todo ser vivo, necessitam dispor de uma adequada quantidade de oxigênio para sobreviver e efetuar os processos bioquímicos para o tratamento de efluentes.

No entanto, pode-se afirmar que, para a conservação desses parâmetros em níveis ideais, é exigido o mantimento de uma mão de obra que seja altamente qualificada e precisa, a fim de se garantir a eficiência do sistema. Esses fatores, por sua vez, quando realizados através de

CAPÍTULO 1 – Introdução

métodos manuais, tornam o projeto mais oneroso e exaustivo, além de aumentar as chances de não se garantir a exatidão necessária, devido a incidências de erros gerados através de falhas humanas.

Diante disso, pode-se dizer que, com a automatização dos processos de medição e controle desses indicadores, torna-se mais vantajosa a manutenção do sistema quando comparada aos métodos tradicionais, tendo em vista a garantia de sua eficiência e precisão, consideradas essenciais para o funcionamento adequado do projeto. Assim, desta forma, proporciona-se um monitoramento contínuo e rigoroso, reduzindo as possibilidades de erros, otimizando o uso de recursos e tornando a proposta mais sustentável.

Como a respiração de um ser vivo é um processo dinâmico, é necessário um sistema de controle de fornecimento de oxigênio no reator aeróbio. Uma maneira de atingir este objetivo é utilizar uma bomba de ar de fluxo variável. Para controlar o fluxo de oxigênio, necessita-se controlar a velocidade de operação do motor elétrico da bomba, sendo estas, muitas vezes, alimentadas através de corrente alternada (CA).

Com isso, para o trabalho em questão, a bomba de ar possui um motor CA monofásico, com frequência de 60 Hz e cuja sua intensidade de injeção de oxigênio depende do valor eficaz da tensão em seus terminais.

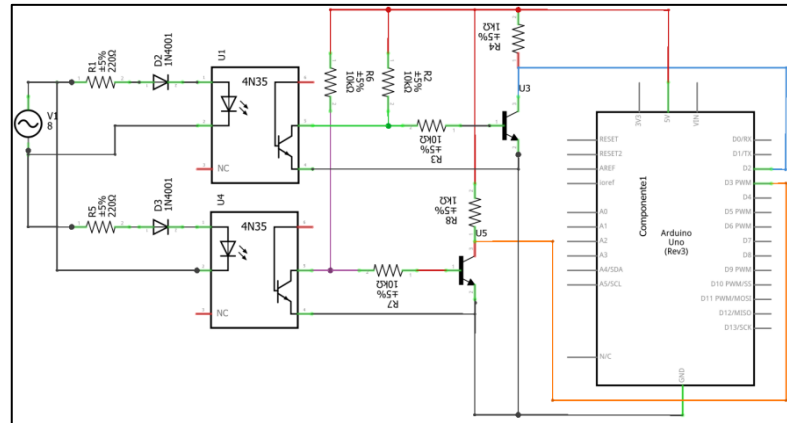
Sabendo disso, uma das técnicas utilizadas para fornecer de tensão CA variável a uma carga é com o uso de inversores. Porém, para isso, seria necessária uma fonte de tensão CC (como barramento), além de um inversor, tornando o projeto mais oneroso.

Assim, uma solução mais simples e econômica para fornecer uma tensão CA monofásica variável é o uso de um conversor CA-CA (gradador). Este circuito pode ser construído utilizando um componente eletrônico chamado de TRIAC, cujo seu ângulo de gatilho determina diretamente qual será a tensão eficaz de injetada na carga.

Em um trabalho de pesquisa, um microcontrolador, tal qual um Arduino Uno, é utilizado para controlar diferentes tipos de sensores e atuadores que também compõem um reator aeróbio (sensores e atuadores de temperatura, pH, oxigênio dissolvido, entre outros)(Santos; Silva; Camargos, 2019).

Nestes trabalho, utiliza-se de um circuito detector de cruzamento por zero (*Zero Cross*), que gera um sinal que é enviado ao pino de interrupção do Arduino à medida que a onda de tensão alternada da rede cruza pelo valor de tensão 0 V. Desta maneira, o Arduino pode gerar um pulso de gatilhamento do TRIAC que esteja em sincronismo com a onda de tensão CA de alimentação elétrica, tal como mostrado na Fig. 1.

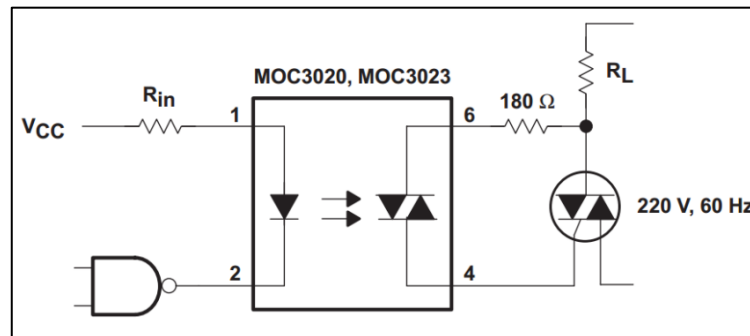
CAPÍTULO 1 – Introdução

Figura 1 – Esquemático do circuito *Zero Cross* utilizando um Arduino.

Fonte: (Santos; Silva; Camargos, 2019).

A Fig. 2 exemplifica o método utilizado para o acionamento de gatilho do componente TRIAC do trabalho.

Figura 2 – Esquemático do circuito de controle utilizando um TRIAC.



Fonte: (Santos; Silva; Camargos, 2019).

Todavia, apesar deste método se apresentar eficiente para o controle do conversor, essas soluções são adequadas somente quando o circuito gradador opera isoladamente. Para o reator aeróbio em questão, haverá a atuação simultânea de variados tipos de controle, como o de pH, temperatura, oxigênio dissolvido, nível do reator, etc.

Tendo em vista a constante necessidade de monitoramento desses parâmetros por parte do microcontrolador, pode-se dizer que, a utilização de interrupções externas pelo Arduino para o controle de oxigênio se torna um empecilho para o restante d o sistema. Já que, para cada interrupção realizada, o fluxo do programa é interrompido e desviado para outro bloco, chamado de desvio de interrupção. Somente quando todo o código programado para o desvio de interrupção é realizado, o microcontrolador retorna ao fluxo principal exatamente de onde havia interrompido anteriormente (Atmel, 2015).

CAPÍTULO 1 – Introdução

Com isso, todo o período de leitura dos outros sensores inseridos no reator fica comprometido, perdendo o sincronismo desses outros atuadores.

Para o controle do TRIAC usando as interrupções externas, é necessário gerar interrupções a cada semiciclo da onda CA de alimentação (ou seja, 8,33 ms para uma onda de 60 Hz), a fim de se produzir os pulsos de gatilhamento. Porém, as interrupções externas utilizando esta frequência interferem diretamente no tempo de atuação dos outros sensores, de modo que, no instante em que estes deveriam estar realizando as leituras periódicas, o fluxo do programa do microcontrolador estará desviado pela interrupção externa. Além disso, o caso inverso também é possível, uma vez que, os algoritmos de leitura dos sensores também podem inabilitar a execução das interrupções externas do Arduino.

Logo, como o processo de respiração de um ser vivo possui uma frequência muito menor que a frequência elétrica, a referência de fluxo de ar que deve ser produzida pela bomba muda muito pouco em relação à frequência elétrica (a taxa de atualização da referência de fluxo de oxigênio é muito menor que a frequência elétrica). Por isso, torna-se necessária a elaboração de um circuito que permita o controle do sistema de gatilhamento do TRIAC, sem que haja a necessidade da utilização de quaisquer tipos de sistemas de interrupção por parte do Arduino.

Ao invés disso, tem-se a utilização do Arduino para somente a leitura e interpretação dos dados obtidos através do sensoramento e, com isso, envio de um sinal CC de referência para uma modulação PWM posteriormente realizada de maneira externa ao microcontrolador. Assim, tem-se uma maior eficiência e precisão em um controle utilizando Arduino, ao se tratar de um sistema com vários sensoramentos.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

Objetiva-se confeccionar um controlador automático o qual assegura o mantimento da taxa de oxigênio dissolvido em condições vitais apropriadas para os micro-organismos no interior do reator químico, utilizando consigo apenas um sistema de sensoramento adequado e um Arduino Uno.

Assim, deve-se projetar, simular e executar um sistema gradador (conversor CA-CA), responsável por modular a tensão alternada obtida da rede e, que no qual, deve ser totalmente controlado através de sinais provindos da saída digital do próprio Arduino. Estes valores, por sua vez, devem ser previamente programados e mapeados de acordo com a aferição realizada através do sensor de oxigênio dissolvido (DO), inserido no interior do reator.

CAPÍTULO 1 – Introdução

Com isso, obtém-se um controlador capaz de manusear digitalmente o módulo da tensão eficaz alternada obtida da fonte (127 V) de tal forma que, quando conectado diretamente aos terminais da carga, no caso a bomba de ar, torna-se capaz de injetar nela uma potência completamente controlada e determinada de acordo com o nível de oxigênio dissolvido demandado pelo reator químico. Já que, em função do tempo, os micro-organismos aeróbios tendem a consumir oxigênio do ambiente para a decomposição da matéria orgânica presente nele e, conseqüentemente, realizar o tratamento de efluentes (Garcia, *et. al.*, 2023).

Desta forma, o sistema de controle deve ser composto por um compressor de ar para bombeamento de oxigênio ao tanque, um sensor DO, um Arduino Uno e, por fim, uma placa de circuito impresso contendo circuitos de sincronismo, controle PWM e de acionamento do conversor CA-CA.

Em suma, enquanto houver sinais de leitura de oxigênio dissolvido mensurados pelo sensor DO, o Arduino Uno tem de efetuar a interpretação de seus dados e, através da configuração programada em sua IDE, enviando um sinal de referência proporcional ao valor lido, variado entre 0 e 5V, para a placa confeccionada, fazendo assim o controle do ângulo de disparo do conversor CA-CA. Isto é, nos momentos em que o reator demandar de muito oxigênio, liga-se a bomba de ar à sua potência máxima, nos momentos em que o mesmo demandar de pouco oxigênio, liga-se a bomba em proporções menores da potência e, nos casos do reator já possuir a proporção ideal de concentração de oxigênio dissolvido ou até mesmo acima dela, a carga deve ser automaticamente desligada.

Toda a documentação foi dividida em tópicos que descrevem com clareza cada etapa de simulação e montagem dos circuitos eletrônicos do conversor, juntamente com seus devidos cálculos de dimensionamento, metodologia, fundamentação e resultados.

Em suma, o trabalho de conclusão de curso foi dividido nos seguintes tópicos:

- **Capítulo 1 – Introdução:** contexto do problema e objetivos do trabalho;
- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica:** apresentação da fundamentação teórica;
- **Capítulo 3 - Sistema Proposto:** metodologia para a confecção do controlador;
- **Capítulo 4 – Resultados:** produto final confeccionado e resultados finais;
- **Capítulo 5 – Conclusões:** desfecho dos resultados e conclusão da obra.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sabe-se que, o Arduino se trata de uma plataforma amplamente utilizada, constituída por hardwares e softwares, com plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, voltada para o desenvolvimento de sistemas automatizados de baixo custo e fácil programação, com aplicações desde as mais simples até as de nível profissional. Com isso, torna-se notório o seu amplo crescimento na utilização pelo mercado de trabalho.

Um experimento realizado pela Acqua Nativa Monitoramento Ambiental detalhou o processo de monitoramento de oxigênio dissolvido em aquicultura utilizando o sensor DO e um Arduino Uno. No blog, é descrito as etapas de montagem e parametrização do componente transdutor em conjunto com a placa Arduino e como são mensurados os seus resultados de acordo com os níveis de leitura e calibração do sensor. Assim, demonstrando a facilidade de manuseio e compatibilidade entre os dois materiais. (Acqua Nativa Monitoramento Ambiental, 2018).

Ademais, para desenvolvimento do conversor CA-CA, responsável pelo controle da intensidade de tensão CA eficaz injetada na bomba, tem-se como base as fundamentações teóricas descritas pelas bibliografias descritas por Malvino e Bates (2016) e Scherz e Monk (2016), para os devidos cálculos e manuseio adequados de componentes eletrônicos utilizados para a confecção da placa. Além disso, para a teoria de conversores de eletrônica de potência, tem-se a obra descrita por Rashid (2014).

2.1 Arduino UNO

O Arduino UNO se trata de uma placa eletrônica, fabricada pela empresa italiana Smart Projects, e amplamente utilizada para projetos de automação, robótica, Internet das Coisas (IoT), entre outros. Sua maior vantagem em utilização se dá devida a sua simplicidade de uso, baixo custo e facilidade de programação.

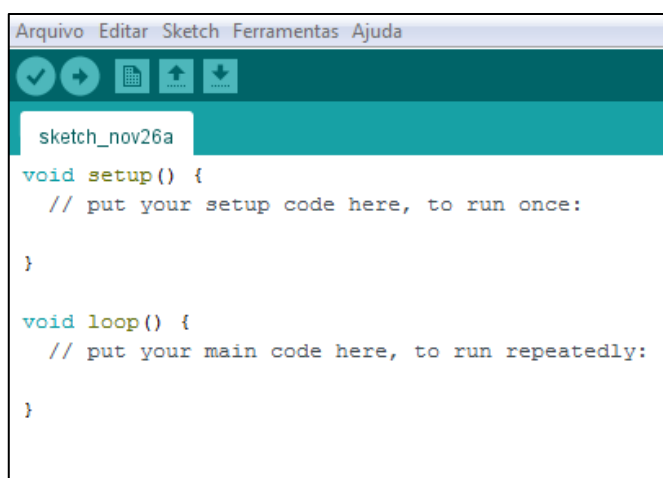
Seu microcontrolador é o ATmega328P e sua parametrização pode ser facilmente realizada através da interface Arduino IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), sendo esta a sua plataforma programável oficial de prototipagem eletrônica de placa única e de código aberto, manuseada através da linguagem de programação baseada em C++.

Neste software, várias funções podem ser programadas durante a estruturação do código, estas desempenham um papel central para o adequado funcionamento dos dispositivos, como LEDs, motores, sensores, entre outros. Cada uma das funções predefinidas pela plataforma determina uma ação, configuração ou interação que o hardware deverá efetuar durante a execução do programa.

Como exemplo de algumas delas, tem-se dentre as principais funções utilizadas, a “pinMode()”, que configura um pino como entrada ou saída, a “digitalWrite()”, que define o estado (alto ou baixo) de saída de um pino digital, a “delay()”, que pausa a execução do código por um tempo definido em milissegundos, entre outras.

A Fig. 3 demonstra como é dividida a estrutura interna do software de programação Arduino IDE.

Figura 3 – Arduino IDE.



Fonte: autor.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

De acordo com o datasheet do ATmega328P, o microcontrolador possui a capacidade de fornecimento de tensão CC através de um barramento de 5 Vcc e um GND. Além disso, possui também 14 portas digitais (sendo 12 utilizáveis) e 6 portas analógicas, todas elas possíveis de serem configuradas como entradas (ler sinais) ou saídas (gerar sinais).

Das portas digitais utilizáveis, em maior parte das vezes, são usadas para envio e recebimento de sinais digitais (0 ou 1). Por outro lado, algumas dessas portas possuem funções especiais, como PWM, que permite a variação da intensidade dos sinais de saída através do manuseio por bits, divididos em valores discretos entre 0 a 255.

Em relação às portas analógicas, estas são geralmente utilizadas para leituras de sinais analógicos, também divididos em valores contínuos, dessa vez em um intervalo de 0 a 1023 bits. Desta forma, facilmente utilizam-se essas portas para a realização de leituras de sensores de variados tipos, como de temperatura, luz, distância, entre outros.

Além disso, o Arduino possui um cristal oscilador de 16 MHz responsável por fornecer o tempo de referência para o microcontrolador, garantindo o funcionamento correto das funções temporizadas da placa eletrônica.

Através da Fig. 4 é possível se observar todas as entradas digitais e analógicas da placa Arduino Uno.

Figura 4 – Arduino UNO.



Fonte: autor.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Dentre as funções temporizadas que o microcontrolador permite que sejam manuseadas, destacam-se como as principais utilizadas em projetos mais avançados, os timers de hardware e as interrupções, usados para controlar com precisão a execução de tarefas temporizadas e sem sobrecarregar o loop principal definido por código na IDE do Arduino.

Esses recursos avançados e intrínsecos aos microcontroladores permitem realizar múltiplas tarefas simultaneamente, além de poderem ser utilizados de várias maneiras diferentes, como contagem, temporização e até interrupção cíclica de um código principal para a realização de outro à parte (Atmel, 2015).

Sabendo disso, pode-se dizer que, dentre as abordagens mais comuns para a realização de controles de potência em alguma carga utilizando o Arduino Uno, utiliza-se como principal função, para a sincronização do sistema de controle com a rede, a interrupção externa (Santos; Silva; Camargos, 2019).

As interrupções externas podem ser definidas como os instantes os quais o código, de maneira programada, interrompe o seu fluxo principal, devida alguma interação de algum sinal externo ao timer para com o microcontrolador e, assim, desvia-se do código principal para que seja realizada outra linha de código, chamada de desvio de interrupção. Assim, depois de finalizada a execução da linha de desvio, o sistema retorna automaticamente ao fluxo de código principal, exatamente na linha de onde havia sido interrompido anteriormente.

De acordo com o trabalho realizado por Santos, Silva e Camargos (2019), as interrupções externas, voltadas para a realização de controles de carga, acontecem a cada sinal periódico de cruzamento por zero da onda de tensão provinda da rede elétrica. Desta forma, torna-se possível a sincronização dos timers do microcontrolador e de todo o sistema de controle com o período de onda da rede. Ademais, essa sincronia é essencial, pois sem ela não é possível se realizar o controle de nenhum conversor de maneira precisa e eficiente (Santos; Silva; Camargos, 2019).

Logo, observa-se que esse método de manuseio é bastante eficaz ao se tratar de um sistema de medição e controle de um parâmetro único, como o acima apresentado. Todavia, quando se refere a um multisensoriamento, como é o caso do interior do reator aeróbio, o qual necessita do constante monitoramento de pH, temperatura e taxa de oxigênio dissolvido, essa abordagem pode não apresentar os melhores resultados.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Sabe-se que, quanto maior for a quantidade de parâmetros a serem mensurados simultaneamente, maior será a demanda por uma temporização contínua e exata por parte do microcontrolador.

Assim, em havendo cíclicas interrupções no fluxo principal do código, utilizadas para controle de alguma carga, têm-se como consequências disso, constantes interferências na sincronia de medição dos outros sensores conectados ao mesmo sistema. Já que, devido aos desvios de interrupção, todo o fluxo de leitura de dados desses sensores também é interrompido.

Portanto, para esse caso, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema conversor externo à placa, capaz de realizar tanto o sincronismo quanto o controle da carga, e demandado apenas por um sinal oriundo da própria saída digital do Arduino, sem que haja a necessidade da utilização das funções de interrupção externa do microcontrolador.

Assim, em meio a todas as características citadas, tem-se o Arduino Uno como uma eficaz e acessível ferramenta de hardware para utilização em trabalhos referentes à automatização de processos.

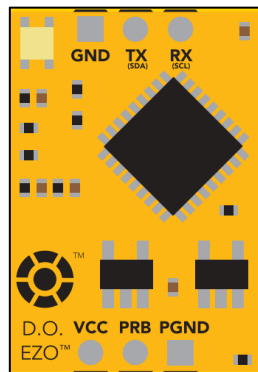
2.2 Sensor DO

O Sensor de Oxigênio Dissolvido, ou somente Sensor DO (*Dissolved Oxygen*), é um transdutor fabricado pela Atlas Scientific e responsável por realizar a leitura da taxa de oxigênio dissolvido em fluidos em um ambiente. Possuindo compatibilidade direta com o Arduino Uno, a comunicação serial entre este sensor e a placa é programada diretamente através da mesma interface de código aberto utilizada pelo próprio Arduino.

De acordo com o datasheet do sensor, o sistema todo é composto por uma placa, contendo o microcontrolador ADM3260, uma entrada, contendo terminais direcionados à alimentação do circuito (+5V e GND) e à comunicação serial realizada entre o sensor e o Arduino, e uma saída, com um circuito isolado, conectada diretamente ao eletrodo de prova, o qual deverá ser submerso ao fluido onde será feita a medição (AtlasScientific, 2023).

A Fig. 5 representa o aspecto físico do sensor DO.

Figura 5 – Sensor DO.



Fonte: (AtlasScientific, 2023).

Ademais, de acordo com o datasheet disponibilizado pela Atlas Scientific, o sistema completo (transdutor e eletrodo de prova) possui as seguintes principais características:

Tabela 1 – Dados técnicos essenciais do sensor DO.

Leitura	Oxigênio Dissolvido
Intervalos	0.00 – 100 mg/L
Resolução	+/- 0.05 mg/L
Tempo de leitura	600 ms
Tensão de Operação	3.3 V – 5 V

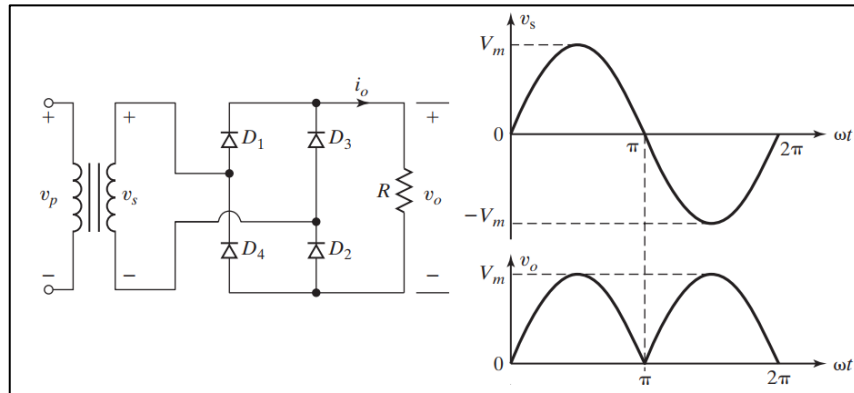
Fonte: (AtlasScientific, 2023).

2.3 Ponte Retificadora Monofásica (RS207)

A ponte retificadora monofásica se trata de um circuito utilizado para converter tensões e correntes alternadas (CA) em contínuas (CC). Sua disposição se dá por meio de 4 diodos posicionados de modo a permitir a retificação de apenas uma fase da fonte, fazendo com que, independentemente do sentido do semiciclo da onda de tensão de entrada, na saída do componente serão conduzidas somente parcelas com semiciclos positivos, de modo com que a frequência de entrada também seja dobrada.

A Fig. 6 exemplifica a montagem dos circuitos e os formatos de onda gerados pelo retificador monofásico de onda completa.

Figura 6 – Representação de um circuito retificador de onda completa.



Fonte: (Rashid, 2014).

O CI RS207 consiste em um circuito eletrônico contendo uma ponte retificadora monofásica de onda completa, cujo circuito equivalente corresponde ao representado pela Fig. 6.

De acordo com seu datasheet, o componente possui 4 terminais, sendo 2 deles voltados para a entrada em corrente alternada (CA) e 2 deles voltados para a saída em corrente contínua (CC) (Secos, 2002).

Além disso, dentre as condições de operação do mesmo, destacam-se as seguintes:

Tabela 2 – Condições de operação da ponte retificadora monofásica RS207 a 25° C.

Tensão Máxima de Pico	1000 V
Tensão Máxima RMS	700 V
Tensão Máxima de Bloqueio CC	1000 V
Corrente Máxima Retificada	2 A
Corrente Máxima CC Reversa	10 μ A
Intervalo de Temperatura de Operação	-65 °C ~ +125 °C

Fonte: (Secos, 2002).

2.4 Optoacoplador (PC817)

O optoacoplador se trata de um componente eletrônico com a função de transmitir sinais elétricos entre dois circuitos diferentes e, ao mesmo tempo, manter o isolamento galvânico entre eles.

Essa isolação ocorre devida a disposição interna dos circuitos do componente eletrônico, constituída em basicamente duas partes principais: uma fonte de luz, composta geralmente por um LED infravermelho que emite luz quando é energizado, e um receptor de luz, composto por um dispositivo sensível à luz, capaz de receber a onda luminosa emitida pela fonte e a convertê-la em sinal elétrico.

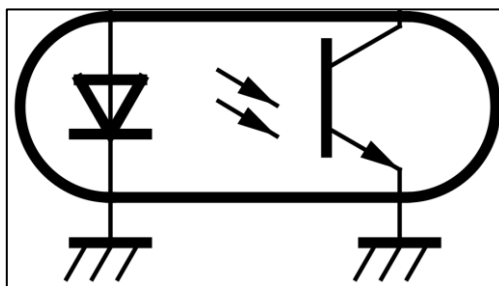
Assim, ambos os componentes são isolados fisicamente um do outro, garantindo o isolamento galvânico entre os circuitos. Porém, devido ao acoplamento óptico, ainda é permitido que haja a transferência de dados ou sinais entre as partes.

Devido as suas características, o dispositivo é comumente utilizado em sistemas que há a necessidade de comunicação entre a rede elétrica, em corrente alternada (CA), e um circuito eletrônico, em corrente contínua (CC).

Dados os diversos tipos de optoacopladores existentes, pode-se dizer que eles se diferenciam pela sua composição e aplicação. Dentre as diversas características construtivas que os diferenciam entre eles, tem-se o tipo de dispositivo, sensível a luz, utilizado para a captação das ondas luminosas emitidas pelo LED. Como exemplo, têm-se os optoacopladores com fototransistor, fotodiodo, fototriac, entre outros.

Através da Fig. 7, pode-se observar os componentes internos de um optoacoplador com fototransistor.

Figura 7 – Representação esquemática do interior de um optoacoplador com fototransistor.



Fonte: (Sharp, 1995).

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

O CI PC817 é um optoacoplador que utiliza de um fototransistor como seu dispositivo de captação de luz. Assim, o componente de maneira geral oferece um bom equilíbrio entre velocidade e isolamento, sendo usado amplamente entre sistemas de comunicação e controle.

A seguir, têm-se as suas principais características de operação:

Tabela 3 – Valores máximos de operação do optoacoplador PC817 a 25° C.

	Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Entrada	Corrente Direta	I_F	50	mA
	Corrente de Pico Direta	I_{FM}	1	A
	Tensão Reversa	V_R	6	V
	Potência Dissipada	P	70	mW
Saída	Tensão Coletor-Emissor	V_{CEO}	35	V
	Tensão Emissor-Coletor	V_{ECO}	6	V
	Corrente do Coletor	I_C	50	mA
	Potência Dissipada do Coletor	P_C	150	mW
	Potência Total Dissipada	P_{TOT}	200	mW
	Tensão de Isolamento	V_{ISO}	5000	V_{RMS}

Fonte: (Sharp, 1995).

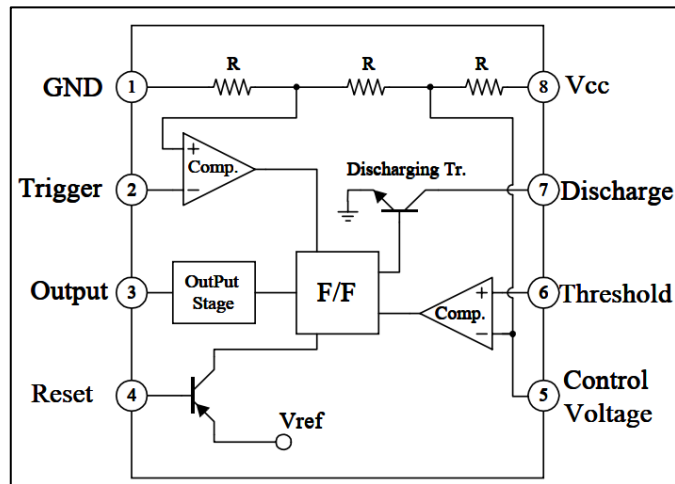
2.5 CI NE555N

O NE555N (popularmente conhecido como 555) se trata de um circuito integrado (CI) muito popular e versátil na eletrônica, sendo amplamente utilizado em diversas aplicações e em vários projetos diferentes, devido a sua flexibilidade de atuação, além do seu baixo custo de operação.

O componente eletrônico se trata de um CI temporizador e pode ser configurado em diversos modos de operação diferentes. Dentre eles, destacam-se seu funcionamento como temporizador, oscilador, gerador de pulsos, bem como também como um componente responsável pela modulação por largura de pulso (PWM).

Possuindo um total de 8 pinos, toda a estrutura interna do CI é baseada em um circuito integrador em conjunto com um comparador de tensão.

Figura 8 – Circuito interno do CI NE555N.



Fonte: (Fairchild, 2002).

De acordo com o diagrama representado na Fig. 8, as principais funções definidas pelos aspectos construtivos dos elementos internos do 555 podem ser descritas como:

- 2 Controladores de tensão, responsáveis por monitorar os níveis de tensão nos pontos de disparo e de reinício do temporizador.
- Um flip-flop, utilizado para controlar a saída de acordo com os valores obtidos pelo estado dos comparadores.
- Um transistor de saída, utilizado para fornecer as saídas digitais de nível lógico alto ou baixo de acordo com o modo de operação do CI.

Além disso, a função de cada pino do componente 555 pode ser descrita da seguinte forma:

Tabela 4 – Pinagem do CI NE555N.

Pino	Nome	Função
1	GND	Fornece o ponto de referência para o sistema.
2	Trigger	Reinicia os ciclos de temporização.
3	Output	Pino de saída do sistema.
4	Reset	Força a reinicialização, independentemente das outras entradas.
5	Control Voltage	Ajustar a tensão de controle para o comparador interno.
6	Threshold	Monitora a tensão do capacitor.
7	Discharge	Descarrega o capacitor em circuitos astáveis e monoestáveis.
8	Vcc	Fonte de alimentação do CI.

Fonte: autor.

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Malvino e Bates (2016, p. 924) afirmam “O NE555 (também o LM555, o CA555 e o MC1455) é um CI temporizador muito usado, um circuito que pode operar em dois modos: monoestável (um estado estável) ou astável (nenhum estado estável). No modo monoestável, ele pode gerar atrasos de tempo precisos desde microssegundos até horas. No modo astável, ele pode gerar ondas retangulares com um ciclo de trabalho variável.”

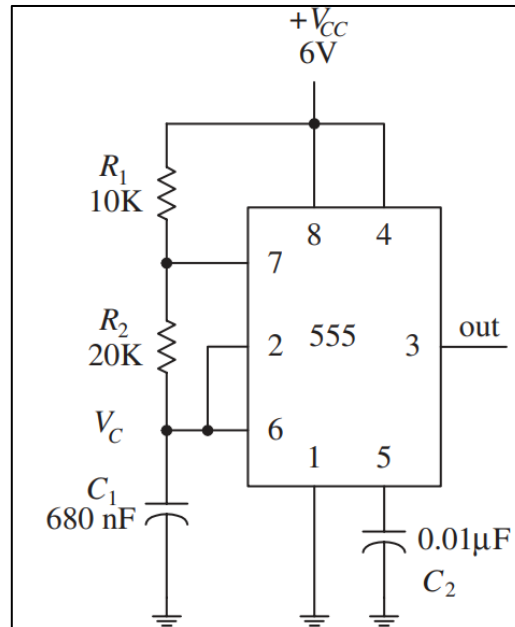
Entre outras palavras, pode-se dizer que, em meio às variadas funções de cada componente interno ao circuito integrado, o NE555 pode atuar com base em dois modos de operação diferentes. Sendo a primeira, o modo astável, o qual utiliza de um circuito RC (resistor e capacitor) externo, conectado ao 555, para a geração de uma onda quadrada contínua, com sinais e pulsos periódicos. E a segunda, o modo monoestável, o qual também utiliza de um circuito RC externo para gerar e controlar pulsos de saída, porém, desta vez, ativados através de um gatilho externo.

De acordo com Scherz e Monk (2016), a disposição e o funcionamento dos devidos modos de operação básicos apresentados ocorrem da seguinte maneira:

2.5.1 Modo de Operação Astável

O modo de operação astável possui como componentes do circuito externo ao CI, dois resistores (nomeados como R1 e R2) e um capacitor (nomeado como C1). Além da disposição de um segundo capacitor externo (nomeado como C2), conectado entre a referência GND e pino 5 do componente, cuja função é somente voltada para o ajuste de tensão de controle para o comparador interno. A Fig. 9 representa a disposição interna desse circuito.

Figura 9 – Disposição do CI NE555N como modo de operação astável.



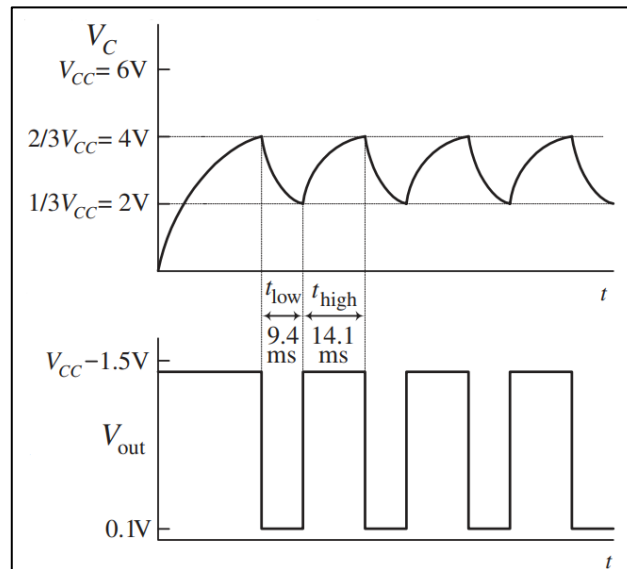
Fonte: (Scherz; Monk, 2016).

Nessa disposição, utiliza-se como tensão de entrada um valor igual a 6 Vcc. Porém, de acordo com o datasheet do CI NE555N, sabe-se que, para o devido funcionamento em condições nominais de operação do componente, a tensão de entrada inserida no barramento Vcc do mesmo pode variar de 4,5 V a 16 V de intensidade.

Ademais, seu funcionamento é descrito da seguinte forma. Enquanto a saída (emitida pelo pino 3) estiver em nível lógico baixo, o capacitor C1 começa a ser carregado pelos resistores R1 e R2. Este capacitor, por sua vez, carrega a tensão em seus terminais até que atinja um valor de 2/3 da tensão de alimentação (Vcc). Fazendo assim com que o comparador externo seja acionado, mudando o estado do flip-flop e, conseqüentemente, resultando na mudança da saída para o nível lógico alto.

Por outro lado, enquanto a saída estiver em nível lógico alto, o capacitor começa a descarregar através do resistor R2, até que a tensão em seus terminais atinja o valor de 1/3 da tensão de alimentação (Vcc). Quando isso ocorre, o comparador de tensão aciona a saída no intuito de retornar ao nível lógico baixo. Assim, todo o ciclo se reinicia. A Fig. 10 representa as formas de onda geradas.

Figura 10 – Ondas geradas pelo CI NE555N no modo de operação astável.



Fonte: (Scherz; Monk, 2016).

O cálculo do seu período de oscilação é descrito da seguinte maneira:

- Período em nível lógico alto (T_{alto}):

$$T_{alto} = 0,693 \times R2 \times C1 \quad (1)$$

- Período em nível lógico baixo (T_{baixo}):

$$T_{baixo} = 0,693 \times R1 \times C1 \quad (2)$$

- Período total (T_{total}):

$$T_{total} = T_{baixo} + T_{alto} = 0,693 \times C1 \times (R1 + R2) \quad (3)$$

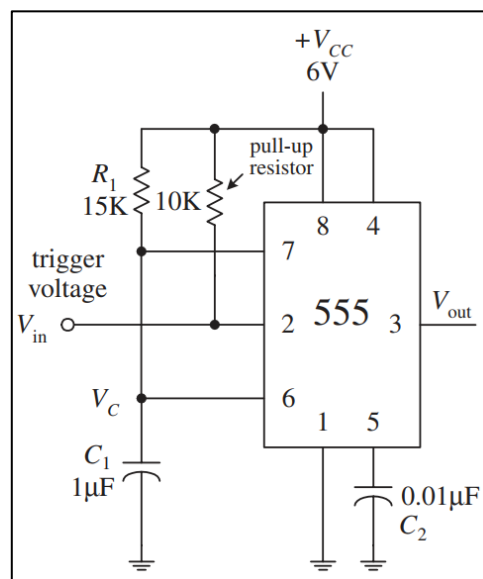
- Frequência de saída (f):

$$f = \left(\frac{1}{T_{total}} \right) = \left(\frac{1}{0,693 \times C1 \times (R1 + R2)} \right) \quad (4)$$

2.5.2 Modo de Operação Monostável

Em relação ao modo de operação monoestável, seu circuito externo é semelhante ao do modo de operação astável, porém, desta vez, há somente um único resistor (nomeado de R1) conectado ao equivalente RC do sistema. A Fig. 11 representa a disposição interna desse circuito.

Figura 11 – Disposição do CI NE555N como modo de operação monoestável.



Fonte: (Scherz; Monk, 2016).

Nessa disposição, utiliza-se também um resistor *pull-up* com 10 k Ω , conectado entre o pino de gatilho (pino 2) e o barramento de tensão de alimentação Vcc (pino 8), com o único intuito de garantia do nível lógico alto para o sistema nos momentos em que for necessário. Porém, dependendo da forma em que se obtém o sinal de referência da entrada Vin (pino de gatilho), tal circuito contendo o resistor *pull-up* não se torna necessário. Uma vez que, sua ausência não afetará o modo de operação do CI.

Com isso, seu funcionamento pode ser descrito da seguinte forma. Quando o pino 2 é submetido a uma tensão equivalente a um nível lógico baixo (0 V), a saída do sistema (pino 3) configura-se como nível lógico alto. O tempo (T) de permanência desse nível lógico alto é determinado pelo valor de R1 e C1.

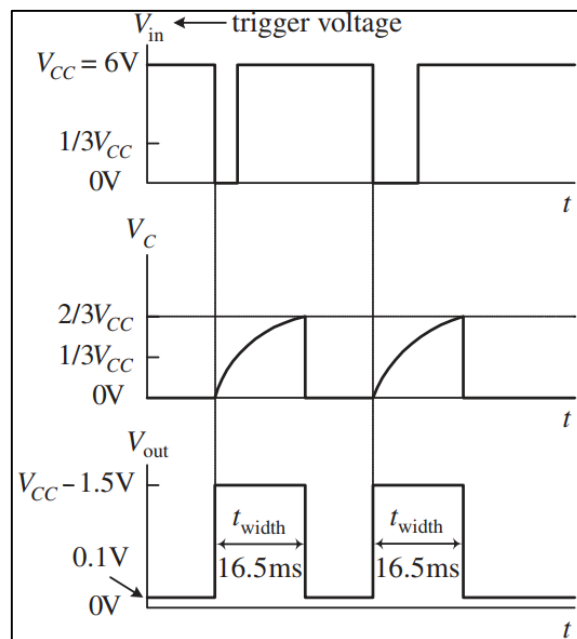
CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Após a passagem do tempo (T), o 555 retorna a sua saída em nível lógico baixo novamente, até que um novo pulso de gatilho seja recebido.

Em termos de ações internas ao CI, o modo de operação ocorre da seguinte maneira. O capacitor conectado ao pino 6 começa a ser carregado através do resistor $R1$. Durante esse processo, a tensão no capacitor aumenta até atingir $2/3$ da tensão de alimentação (V_{CC}). Depois de atingido esse valor, o comparador de tensão interno muda o estado do flip-flop, fazendo com que o capacitor descarregue a sua tensão, atingindo o nível lógico baixo (0 V) novamente.

Assim, o circuito permanece em seu estado baixo até receber um novo pulso de gatilho pela entrada. A Fig. 12 representa as formas de onda geradas.

Figura 12 – Ondas geradas pelo CI NE555N no modo de operação monoestável.



Fonte: (Scherz; Monk, 2016).

O cálculo do período de tempo (T) de permanência do nível lógico alto de saída e, consequentemente, o período da largura da onda quadrada gerada, pode ser calculado como sendo:

$$T = 1,1 \times R1 \times C1 \quad (5)$$

Assim, com base na teoria apresentada, pode-se dizer que, uma vez tendo o controle do sinal de referência incidente no pino de gatilho do 555, em conjunto com sua configuração em

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

um modo de operação monoestável, é possível realizar um sistema gerador de onda PWM completamente controlada.

2.6 Modulação PWM

O circuito PWM (Modulação por Largura de Pulso) é responsável por gerar pulsos de ondas de tensão quadradas, com razões cíclicas (Duty Cycle) ajustáveis entre 0 e 100%. Essa modulação determina a quantidade de tempo em que a onda fica em nível alto (ON) e em nível baixo (OFF) dentro de um ciclo. Desta forma, é possível se realizar o controle da potência média fornecida à bomba de ar (Malvino; Bates, 2016).

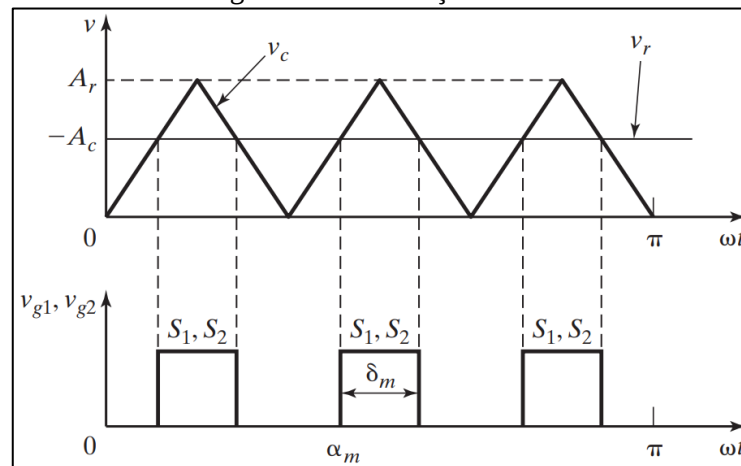
Entre outras palavras, enquanto a razão cíclica estiver em 0%, o sinal gerado pela modulação deverá ser uma constante de tensão CC em nível lógico baixo (OFF), conseqüentemente, a tensão eficaz de saída na carga deverá igual a 0 V e, assim, a potência de saída na mesma será nula. Por sua vez, no caso de uma razão cíclica igual a 100%, o sinal gerado deverá ser uma constante de tensão CC em nível lógico alto (ON), a tensão eficaz na carga será a nominal disposta pela rede e, portanto, a potência de saída da carga será máxima.

Por fim, seguindo a mesma lógica, em casos em que a razão cíclica se encontra entre 0% e 100%, a onda modulada deverá ser igual a pulsos quadrados de tensão cuja razão indica o período de tempo em que a onda permanece em nível lógico alto em relação ao tempo total de um semiciclo (8,33 ms). Isto é, em um Duty Cycle de 65%, o sinal gerado será uma onda quadrada alternando entre os níveis de tensão lógica alta (ON) e lógica baixa (OFF), com o nível alto ocupando 65% do ciclo e o nível baixo ocupando os outros 35%.

Ademais, Rashid (2014, p. 446) afirma que “No controle PWM, as chaves do conversor são ligadas e desligadas várias vezes durante um semiciclo, e a tensão de saída é controlada pela variação da largura dos pulsos. Os sinais de acionamento são gerados pela comparação de uma onda triangular com um sinal CC”.

Através da Fig. 13, pode-se observar como é formada as ondas pela modulação PWM.

Figura 13 – Modulação PWM.



Fonte: (Rashid, 2014).

Assim, observa-se que, para que a modulação PWM seja realizada, torna-se indispensável a realização de 3 passos, sendo eles, a geração de uma onda triangular (simétrica ou dente de serra), a geração de um sinal de referência (podendo este ser contínuo ou não) e atuação de um dispositivo comparador (componente o qual realizará a comparação entre os dois sinais anteriores).

Com isso, pode-se dizer que a modulação por largura de pulso é responsável por gerar ondas quadradas, cujo período é totalmente controlável através da comparação entre o sinal de referência e a onda triangular. Assim, o produto gerado configura-se da seguinte forma, enquanto a intensidade do sinal de referência for numericamente menor que a da onda triangular, tem-se um sinal gerado em nível lógico baixo. Por sua vez, enquanto a intensidade do sinal de referência for numericamente maior ou igual a da onda triangular, tem-se um sinal gerado em nível lógico alto.

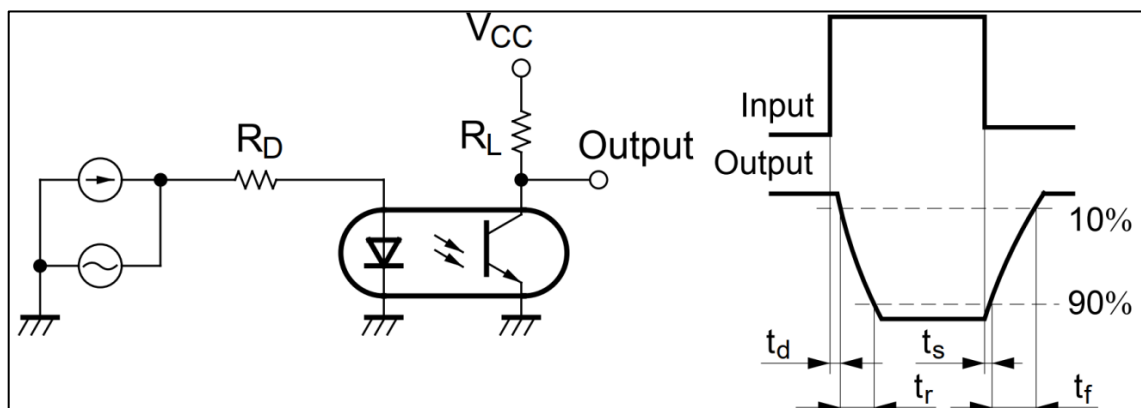
Portanto, a modulação em questão não se dá pela intensidade da tensão de saída gerada e sim pela razão cíclica do período entre o sinal em nível lógico alto e o sinal em nível lógico baixo.

2.7 Circuito Detector de Cruzamento por Zero (Zero Cross)

Para se obter o funcionamento adequado de todo controlador conversor que trabalhe conectado à rede, torna-se necessária a realização de um sistema que sincronize as fases da onda de tensão alternada da fonte com os ângulos de gatilhamento do controlador em questão. Já que, sem isso, o conversor perde a sincronia e o controle de tensão na carga não é possível de ser realizado. Para isso, utiliza-se o circuito detector de cruzamento por zero, ou então *Zero Cross*.

O circuito *Zero Cross* consiste em um sistema capaz de detectar a mudança do estado do semiciclo positivo para o negativo e do semiciclo negativo para o positivo em uma onda de tensão CA. Assim, o circuito possui a função de gerar pulsos de tensão síncronos às passagens pelo zero das ondas de tensão alternadas da rede. Sendo utilizado pelo controlador como um indicativo do momento exato em que se inicia um semiciclo finaliza outro, para que assim possa controlar de maneira cíclica o ângulo de gatilhamento do TRIAC e realizar o controle adequado de tensão (Malvino; Bates, 2016).

Figura 14 – Esquemático de um circuito Zero Cross utilizando Arduino.



Fonte: (Sharp, 1995).

A Fig. 14, ilustrada no datasheet do optoacoplador PC817, determina a configuração de um circuito gerador de pulsos através da detecção de cruzamento por zero. Para isso, utiliza-se:

Um resistor de entrada para dissipação de potência provinda da rede, bem como redução da tensão eficaz de entrada, tendo em vista que a tensão de operação dos componentes eletrônicos utilizados são inferiores à tensão da rede;

Um optoacoplador, que consiste em um circuito encapsulado contendo um diodo emissor de luz (LED), em conjunto com um fototransistor, os quais possuem a função de transferir sinais elétricos entre dois circuitos isolados utilizando somente luz;

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Por fim, através da saída pelo emissor do fototransistor, tem-se um resistor *pull-down* ou *pull-up*, usado para garantir o nível lógico baixo ou alto para a saída, respectivamente, variando de acordo com a utilidade.

O circuito de detecção de cruzamento por zero, como consta na Fig. 14, pode ser descrito da seguinte maneira. Enquanto houver valor instantâneo de tensão não nulo na rede, isto é, nos períodos em que a onda de tensão não cruzar o zero, o LED no interior do optoacoplador estará conduzindo corrente e, portanto, o fototransistor em seu interior entrará em estado de condução, fazendo com que a saída Output se encontre em nível lógico baixo (0 Vcc). Por sua vez, enquanto o valor instantâneo de tensão na rede for igual a zero, o período indicará um momento de cruzamento pelo zero na onda da rede. Assim, nesse exato instante, o LED deixará de conduzir corrente e, por conseguinte, o fototransistor entrará em estado de corte, fazendo com que a tensão na saída Output indique nível lógico alto (+5 Vcc), garantido através do resistor *pull-up*. Desta forma, os sinais de sincronismos gerados se tratam de pulsos periódicos de nível lógico alto a cada momento de cruzamento por zero.

De forma análoga à anterior, também é possível se gerar as ondas de sincronismo através de pulsos invertidos de tensão, isto é, a cada instante de cruzamento por zero da onda de entrada, haverá a geração de sinais de nível lógico baixo (0 Vcc), ao contrário do anterior. Para isso, tem-se uma montagem alternativa do circuito proposto pela Fig. 14. Ao invés da saída Output estar conectada ao coletor do fototransistor, esta deve ser ligada ao emissor do mesmo.

Da mesma forma, um resistor *pull-down* deverá ser posicionado entre o emissor e GND do sistema, enquanto a tensão de alimentação Vcc deverá estar diretamente conectada ao coletor do fototransistor. Assim, assegura-se a garantia do nível lógico baixo através do resistor *pull-down* para todo o período em que houver cruzamento por zero na tensão da rede. Enquanto que, no restante do período, o nível lógico da saída Output será alto.

2.8 OptoTRIAC (MOC3021)

O optoTRIAC se trata de um optoacoplador que, assim como descrito no Cap. 2.4, possui como função primordial, a transmissão de sinais entre dois circuitos diferentes com a capacidade de isolar fisicamente as duas partes do sistema.

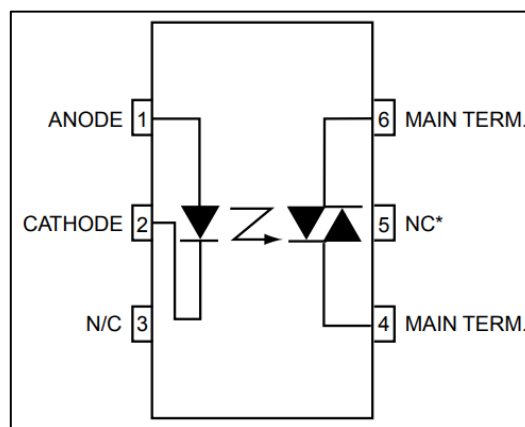
CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Por sua vez, a principal diferença entre o optoTRIAC dos outros optoacopladores está primeiramente no seu dispositivo sensível à luz, capaz de captar as ondas infravermelho geradas pelo LED interno e convertê-las em sinal elétrico. Enquanto a maior parte dos optoacopladores utiliza o fototransistor para essa função, o optoTRIAC utiliza de um componente conhecido como TRIAC, usados em circuitos de controle de potência em corrente alternada (CA).

Assim, sua maior vantagem está na capacidade do controle de sinais de alta tensão de forma eficiente.

O exemplo de um optoTRIAC muito utilizado em projetos é o MOC3021. Na Fig. 15, observa-se o esquemático de ligação desse componente.

Figura 15 – Esquemático de ligação do MOC3021.



Fonte: (Fairchild, 2003).

A seguir, têm-se as suas principais características de operação:

Tabela 5 – Valores máximos de operação do optoTRIAC MOC3021 a 25° C.

	Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Entrada	Corrente Direta	I_F	60	mA
	Tensão Reversa	V_R	3	V
	Potência Total Dissipada	P_D	100	mW
Saída	Tensão Terminal de Saída	V_{DRM}	400	V
	Corrente de Pico	I_P	1	A
	Potência Total Dissipada	P_D	300	mW

Fonte: (Fairchild, 2003).

2.9 TRIAC

O TRIAC (ou *Triode for Alternating Current*) se trata de um componente semicondutor com ampla atuação em circuitos que envolvem controle de potência em corrente alternada (CA). Apesar de ser categorizado como um semicondutor, devido ao seu aspecto construtivo, ele possui a capacidade de conduzir corrente elétrica em ambas as direções (tanto no semiciclo positivo quanto no negativo), tornando-o vantajoso em relação aos circuitos convencionais que utilizam de comutação manual e componentes mecânicos para a realização de controle de potência CA na carga.

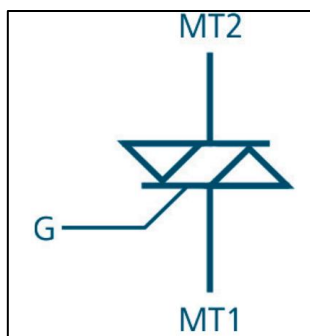
Sendo essencialmente um dispositivo de chaveamento, o TRIAC funciona como um interruptor capaz de realizar acionamentos e desligamentos cíclicos de forma controlada em uma carga, fazendo com que dessa maneira haja um controle preciso de potência elétrica injetada na mesma. Além disso, destacando como vantagem, o dispositivo possui a capacidade de condução em ambos os sentidos de polarização (Rêgo Segundo; Rodrigues, 2015).

Em relação às suas características construtivas, os terminais do semicondutor se dividem em três pinos: MT1 (ânodo 1 – pino 1), MT2 (ânodo 2 – pino 2) e G (Gate – pino 3). Sabendo que o TRIAC foi projetado para a atuação em corrente alternada, pode-se dizer que não há sentido de polaridade definido para o manuseio do dispositivo. Ou seja, o sentido do fluxo de potência da carga poderá fluir tanto de MT1 para MT2 como de MT2 para MT1.

O pino 3 do TRIAC é responsável pelo gatilhamento, ou seja, é através dele que ocorre o controle dos períodos exatos em que o dispositivo é ativado (conduzindo corrente elétrica pelo circuito) e desativado (bloqueando a passagem de corrente pelo circuito).

Seu esquemático é visto na Fig. 16.

Figura 16 – Esquemático do TRIAC.

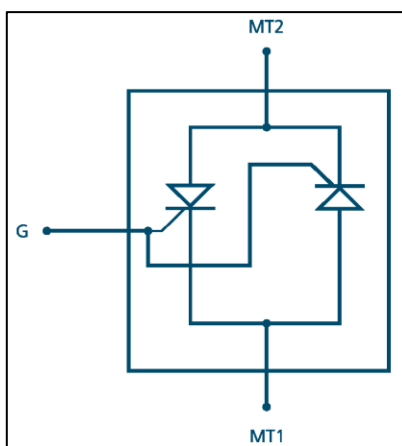


Fonte: (Rêgo Segundo; Rodrigues, 2015).

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

Sua composição física pode ser descrita como dois SCRs (*Silicon Controlled Rectifier* ou Retificador Controlado de Silício) dispostos em um circuito antiparalelo, assim como visto na Fig. 17.

Figura 17 – Esquemático da composição interna do TRIAC.



Fonte: (Rêgo Segundo; Rodrigues, 2015).

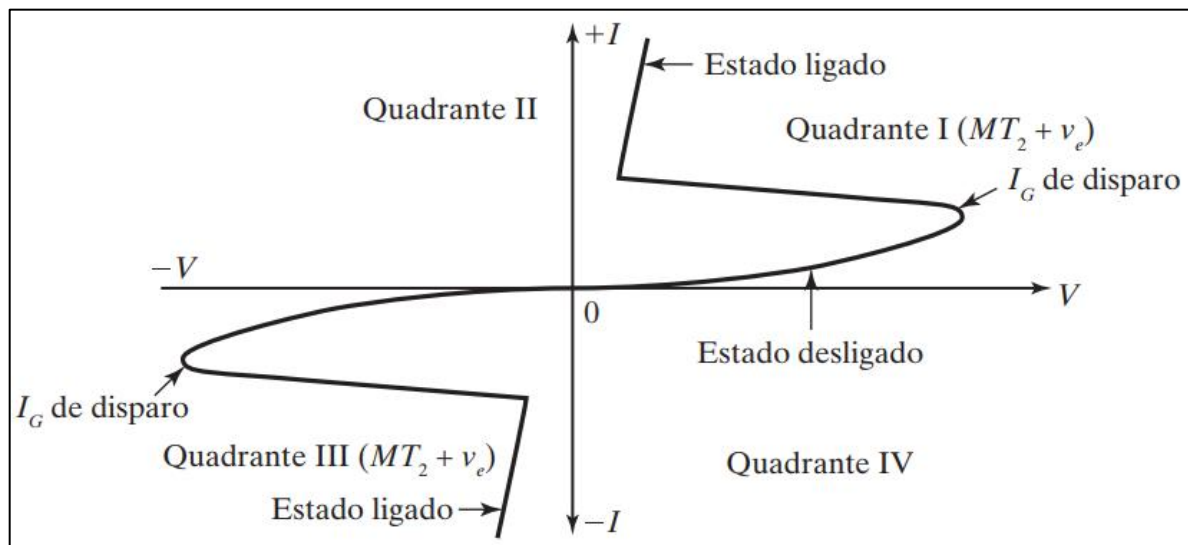
Por conta dessa característica construtiva, os pinos 1 e 2 do dispositivo são nomeados ambos como ânodo, ao invés de ânodo e cátodo, como comumente caracterizados em outros semicondutores.

Além do que, por essa mesma razão, o dispositivo se faz capaz de conduzir corrente para ambos os sentidos. Já que, durante a condução do semiciclo positivo da onda de tensão, um dos terminais do TRIAC se configurará como cátodo e o outro como ânodo. Por conseguinte, o inverso ocorre durante a condução do semiciclo negativo da onda de tensão. Durante esse período, o terminal do TRIAC que se caracterizava como ânodo durante o semiciclo positivo se tornará o cátodo, por sua vez, o terminal que antes se caracterizava como cátodo se tornará o ânodo.

Desta forma, pode-se afirmar que, durante a utilização de um TRIAC para controle de corrente alternada, sempre haverá no máximo um SCR conduzindo corrente em um dado instante de tempo. Nunca os dois ao mesmo tempo. Uma vez que, enquanto um dos SRC se encontra em estado de condução, o outro se encontra em bloqueio. Fazendo com que cada um deles seja responsável pelo controle de chaveamento de um único sentido do simiciclo.

A Fig. 18 demonstra a curva característica real de funcionamento de um TRIAC.

Figura 18 – Curva característica de um TRIAC.



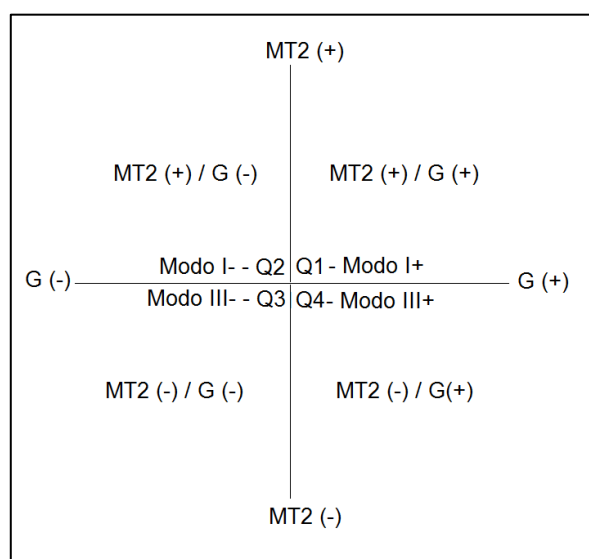
Fonte: (Rashid, 2014).

Com isso, de acordo com a curva característica, pode-se dizer que os TRIACs podem ser disparados de 4 modos diferentes. Esses modos são definidos como:

- Modo I+: Terminal MT2 positivo em relação ao terminal MT1. Logo, o sentido da corrente tem direção a entrar no dispositivo, ou seja, Gate positiva.
- Modo I-: Terminal MT2 positivo em relação ao terminal MT1. Porém, o sentido da corrente tem direção a sair do dispositivo, ou seja, Gate negativa.
- Modo III+: Terminal MT2 negativo em relação ao terminal MT1. Além disso, o sentido da corrente tem direção a entrar no dispositivo, ou seja, Gate positiva.
- Modo III-: Terminal MT2 negativo em relação ao terminal MT1. Além disso, o sentido da corrente tem direção a sair do dispositivo, ou seja, Gate negativa.

Com isso, os 4 modos de disparo diferentes podem ser expressos pelos 4 quadrantes a seguir na Fig. 19:

Figura 19 – Quadrante dos modos de disparo do TRIAC.



Fonte: autor.

Além disso, observa-se que, os quadrantes Q1 e Q3 são as áreas as quais se tem maior sensibilidade de disparo de gatilho, quando comparadas com as outras. Logo, observa-se que o disparo de um TRIAC não é um processo simétrico. Isto é, ele não dispara nas mesmas condições para ambos os quadrantes.

Rashid (2014, p. 389) diz que “Como o TRIAC é um dispositivo bidirecional, seus terminais não podem ser chamados de anodo e catodo. Se o terminal *MT 2* for positivo em relação ao *MT1*, o TRIAC pode ser ligado pela aplicação de um sinal de porta positivo entre a porta *G* e o terminal *MT1*. Se o terminal *MT2* for negativo em relação ao *MT1*, ele é ligado pela aplicação de um sinal de porta negativo entre a porta *G* e o terminal *MT1*. Não é necessário ter ambas as polaridades dos sinais de porta, pois um TRIAC pode ser ligado tanto por um sinal de porta positivo quanto por um negativo. Na prática, as sensibilidades variam de um quadrante para outro, e os TRIACs normalmente são operados no quadrante I+ (tensão e corrente de porta positivas) ou no quadrante III- (tensão e corrente de porta negativas).”

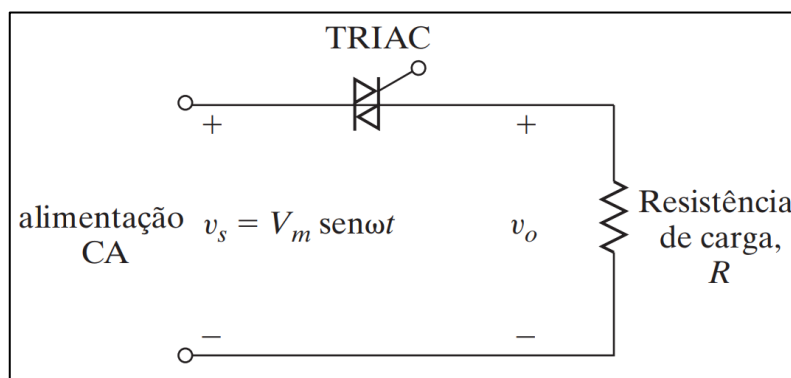
Portanto, sabendo que o pino de gatilho do TRIAC é responsável por determinar os períodos de condução do circuito de carga, pode-se dizer que, caso sejam emitidos pulsos de sinais periódicos controlados no terminal de Gate do dispositivo (tais quais as ondas PWM), torna-se possível realizar diretamente o controle da potência de carga CA através somente do manuseio adequado da modulação por largura de pulso. Desta forma, tem-se como produto, um conversor CA-CA, o qual, na entrada do sistema é inserido a fonte de tensão CA da rede e, após

CAPÍTULO 2 – Fundamentação Teórica

todo o processo de sincronismo e modulação PWM, na saída do sistema, tem-se um controle de tensão CA prático e preciso na carga.

O circuito de um conversor CA-CA pode ser representado de uma forma simplificada de acordo com o seguinte esquemático da Fig. 20:

Figura 20 – Circuito simplificado de um conversor CA-CA.



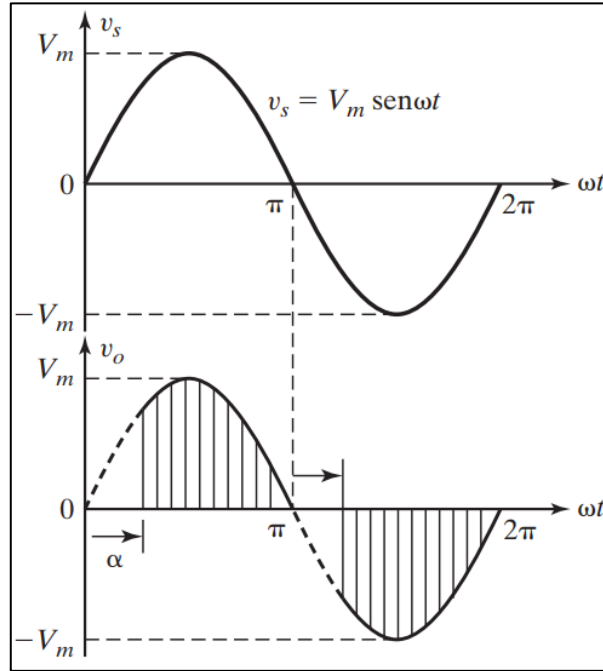
Fonte: (Rashid, 2014).

Sabendo que um ciclo completo de uma onda de tensão CA equivale a um ângulo de 360° (2π radianos), ou então, dois semiciclos de 180° (π radiano), pode-se dizer que, em um conversor CA-CA, a razão cíclica da onda PWM gerada, que posteriormente é utilizada como pulsos de disparos de gatilho do TRIAC, também é mensurada em função de um ângulo α , variado entre 0 e 180° , ou então, 0 e π radiano.

Como as ondas PWM possuem um período de 8,33 ms (equivalente a um semiciclo), o controle de gatilho do TRIAC é realizado de maneira individual para cada instante de tempo iguais a esse. Por isso a variação do ângulo α de disparo ocorre entre os ângulos de 0 a 180° e não a 360° , que indicaria um ciclo completo.

Entre outras palavras, a modulação PWM gera pulsos de ondas quadradas com período total igual a 8,33 ms. Com isso, como o ângulo de disparo do TRIAC se trata de uma grandeza diretamente proporcional à razão cíclica da onda PWM, este fica restrito a uma variação máxima em graus (ou radianos) da onda de tensão equivalente ao tempo total do período. Ou seja, para cada semiciclo da onda CA da carga, haverá um ângulo α de mesmo valor responsável por indicar o período exato em que o conversor deve ser ligado (permitindo a condução de corrente elétrica) ou desligado (interrompendo a passagem da corrente elétrica).

Figura 21 – Ondas de tensão na rede (em cima) e na carga (em baixo) utilizando um conversor CA-CA.



Fonte: (Rashid, 2014).

Como observado na Fig. 21, o ângulo de gatilho α é responsável por gerar “recortes” nas ondas de tensão da carga, de tal forma que, quanto maior for esse ângulo (máximo em 180°), menor será o valor eficaz da onda de tensão na carga (mínimo em 0 V). Assim, consequentemente, menor será a potência injetada na mesma.

Por sua vez, quanto menor for o ângulo α (mínimo em 0°), maior será o valor eficaz da onda de tensão na carga, até se chegar ao seu valor nominal da rede, cujas ondas de tensão possuem os períodos completos, sem “recortes” e com a potência máxima sendo injetada na carga (situação equivalente ao conversor CA-CA desligado).

Por fim, pode-se calcular o valor eficaz da tensão resultante na carga, utilizando um conversor CA-CA, como sendo uma equação em função do ângulo de disparo do TRIAC.

$$V_L = V_{RMS} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right)} \quad (6)$$

3 SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto consiste no dimensionamento, simulação e confecção de um sistema de controle automático da taxa de oxigênio dissolvido no interior de um reator químico aeróbio, baseado em um conversor CA-CA, em conjunto com o sensor DO e um Arduino Uno para sensoriamento e processamento de dados.

Para fins de simulação dos circuitos, bem como visualização do comportamento de seus parâmetros elétricos, antes mesmo da confecção da placa do conversor, tem-se o software Proteus 8 Professional. Neste, há um extenso banco de dados que permite se utilizar vários modelos específicos de componentes eletrônicos, cujos parâmetros elétricos internos são programados de tal forma que os resultados simulados se tornam muito próximos aos obtidos através da montagem real em bancada. Assim, como base para testes em simulações de circuitos, a utilização do software permite trazer uma precisão e confiabilidade maior para o projeto.

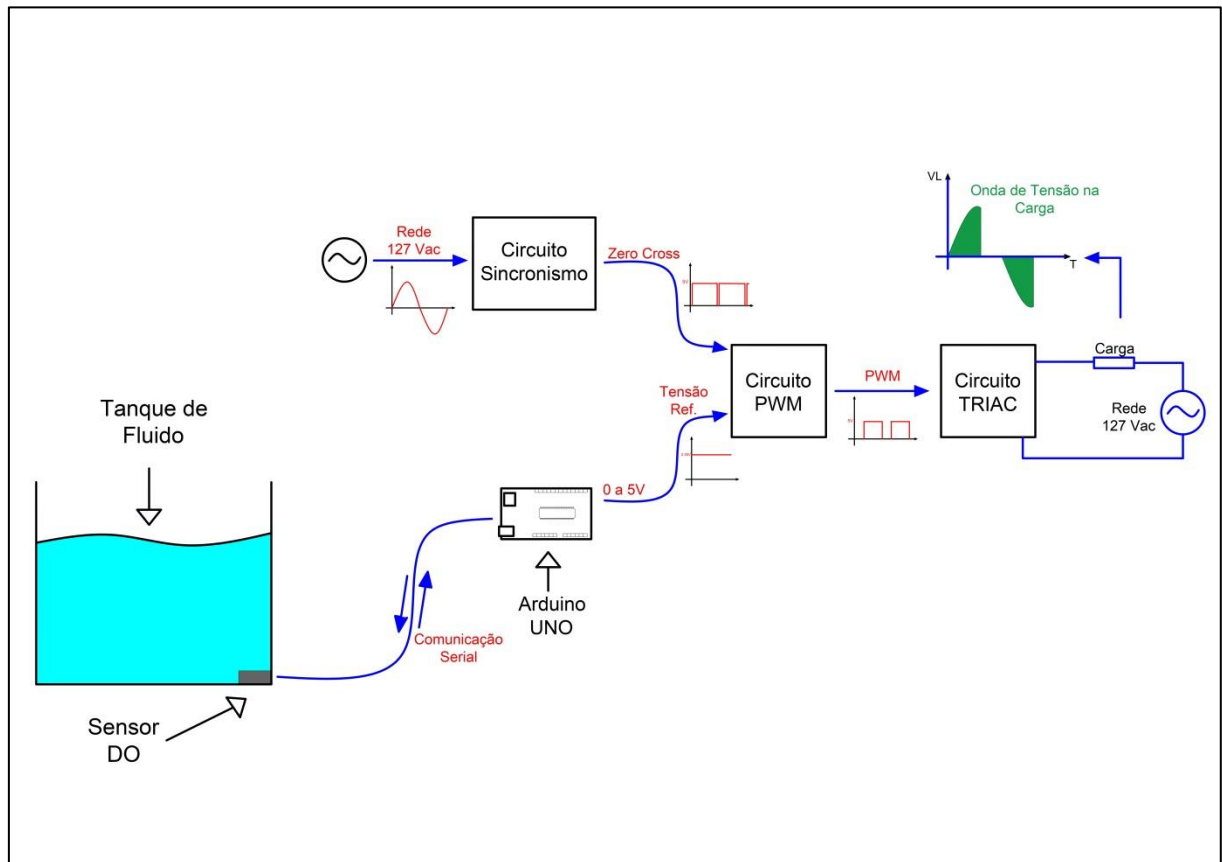
Toda a metodologia de execução do projeto pode ser dividida em tópicos que descrevem com clareza cada etapa de montagem dos circuitos eletrônicos do conversor, juntamente com seus devidos cálculos de dimensionamento, metodologia, fundamentação e resultados.

Com isso, pode-se subdividir as etapas de simulação e montagem dos circuitos eletrônicos em 4 subgrupos:

1. **Leitura e Interpretação dos Dados:** Consiste na etapa de sensoriamento de oxigênio pelo transdutor (sensor DO) e, em seguida, a comunicação serial dos sinais medidos com o Arduino;
2. **Circuito de Sincronismo:** Etapa responsável por sincronizar todo o sistema conversor com as ondas de tensão providas da rede elétrica;
3. **Circuito Gerador de Onda PWM:** Estágio de geração de ondas PWM síncronas com a rede, responsáveis pelo acionamento periódico adequado de gatilho do conversor;
4. **Circuito de Acionamento do Conversor CA-CA:** Circuito final responsável pelo acionamento do TRIAC e, conseqüentemente, a devida modulação das ondas de tensão na carga.

A Fig. 22 exemplifica de maneira didática o fluxograma de todo o sistema proposto, contendo cada uma das 4 etapas citadas.

Figura 22 – Diagrama de blocos do sistema de controle.



Fonte: Autor.

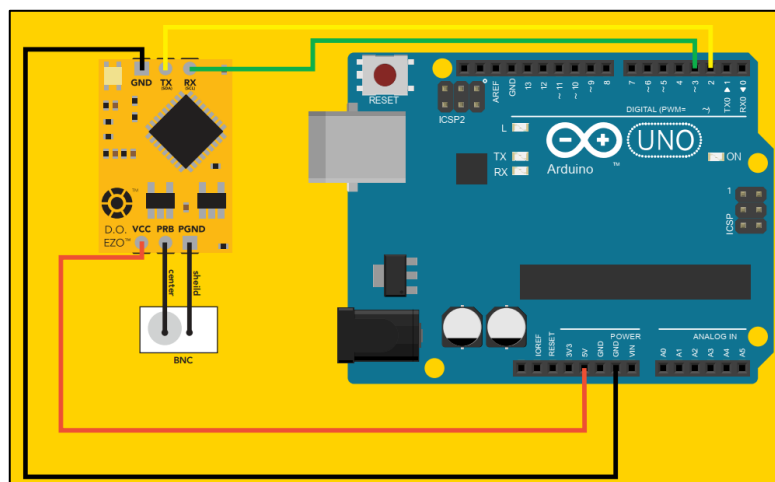
3.1 Leitura e Interpretação dos Dados

Sabe-se que, dentre as conexões realizadas entre os terminais do sensor e do Arduino Uno, reserva-se para a comunicação serial entre o componente e a placa as portas digitais de número 2 e 3 do Arduino. Além disso, como fonte de alimentação de tensão, tem-se a interconexão das entradas +5 Vcc e GND dos mesmos.

Através da Fig. 23, observa-se o diagrama de ligação do sensor DO com o Arduino Uno.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

Figura 23 – Diagrama de conexão entre o sensor DO e o Arduino Uno.



Fonte: (AtlasScientific, 2023).

Depois de realizadas as devidas ligações, utiliza-se como forma de parametrização e processamento de dados, o software Arduino IDE, com linguagem de programação baseada em C++ e em outras linguagens de código aberto, como Wiring e Processing.

Para fins de monitoramento, o sensor possui a capacidade de imprimir algarismos decimais no monitor, variados entre 0.00 e 15.00, os quais mensuram proporcionalmente os valores de taxa de oxigênio dissolvido obtidos pelo terminal do eletrodo inserido no reator. Assim como expresso na Tab. 1, essa faixa numérica define em parâmetros reais uma variação entre 0 e 100 mg/L do elemento químico dissolvido em fluido.

Para um intervalo numérico considerado ideal e permissível às condições vitais dos micro-organismos aeróbios, a escala numérica deve-se manter entre 5,0 mg/L e 6,0 mg/L. Ou seja, a faixa tolerável para a garantia de sua sobrevivência deve ser mantida entre estreitos intervalos decimais de medição.

Logo, para fins de eficiência em tratamento de efluentes, exige-se uma alta precisão de controle ao se tratar de OD. Já que, assim como os seres humanos, as bactérias aeróbias necessitam de uma faixa muito específica de oxigênio dissolvido em fluido para o seu sustento, de tal forma que, em um ambiente cujas concentrações desse elemento se mantêm acima ou abaixo da ideal, pode se tornar prejudicial à sobrevivência dos micro-organismos que ali habitam (Fiorucci; Benedetti Filho, 2005).

Além do mais, como sequência à comunicação realizada entre o sensor e o Arduino, tem-se, como função do próprio microcontrolador, o envio de um sinal de tensão CC à placa

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

confeccionada, proporcional aos valores lidos pelo sensor, a fim de ser utilizado posteriormente como sinal de referência para a modulação PWM que ocorrerá internamente ao conversor CA-CA.

Desta forma, enquanto o sensor indicar uma queda significativa de oxigênio dissolvido no reator, o Arduino automaticamente enviará sinais altos de tensão ao controlador (próximos a 5 V), que posteriormente fará com que a bomba de ar funcione à máxima potência, a fim de se atender rapidamente a essa demanda de oxigênio pelo reator. Além disso, se o sensor indicar valores ligeiramente abaixo da faixa pré-programada como ideal, o Arduino também enviará sinais proporcionalmente inferiores ao controlador (entre 1 e 4 V), no intuito de ainda se realizar a uso da bomba de ar, porém em potências inferiores à nominal da mesma. Assim, é possível se realizar o ajuste de oxigênio dissolvido de maneira mais precisa. Isto é, independente da quantidade de oxigênio demandada pelo reator, a bomba de ar terá a capacidade de suprir somente o necessário para se adequar à faixa permitida e, após isso, e mesma deve ser automaticamente desligada.

Por sua vez, no caso do sensoramento indicar valores ideais à faixa ou até mesmo acima dela, o Arduino enviará um sinal nulo (0 V) como referência ao controlador e este fará com que a bomba de ar seja automaticamente desligada, cessando o suprimento de oxigênio pelo aparelho.

Toda essa configuração pode ser demonstrada pelo código de programação representado na Fig. 24.

Figura 24 – Código de programação para envio de sinal de referência.

```
if (DO >= 5.00){  
  analogWrite(11, LOW);  
} else if (DO < 5.00){  
  analogWrite(11, map(DO, 0.00, 5.00, 255, 0));  
}
```

Fonte: Autor.

Pode-se dizer que, o código demonstrado na figura acima é responsável por mapear os parâmetros de oxigênio dissolvido e analisar qual deverá ser o nível de tensão enviado à referência do sinal PWM na saída. Já que, todo o controle automático do compressor de ar será determinado pela amplitude do sinal de referência provindo da porta digital do Arduino.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

Desta forma, enquanto o sinal DO provindo do sensor indicar que a concentração de oxigênio se enquadra em parâmetros ideais ou acima deles, o valor de tensão CC enviado à porta digital 11 (saída do sinal de referência) deverá ser igual a 0 V.

Por sua vez, no momento em que o sinal for menor do que 5.00, o sistema indicará que haverá a necessidade de emissão de oxigênio por parte do compressor de ar e, então, o sinal de referência provindo do Arduino será não nulo (diferente de 0 V) e a bomba deverá ser ligada.

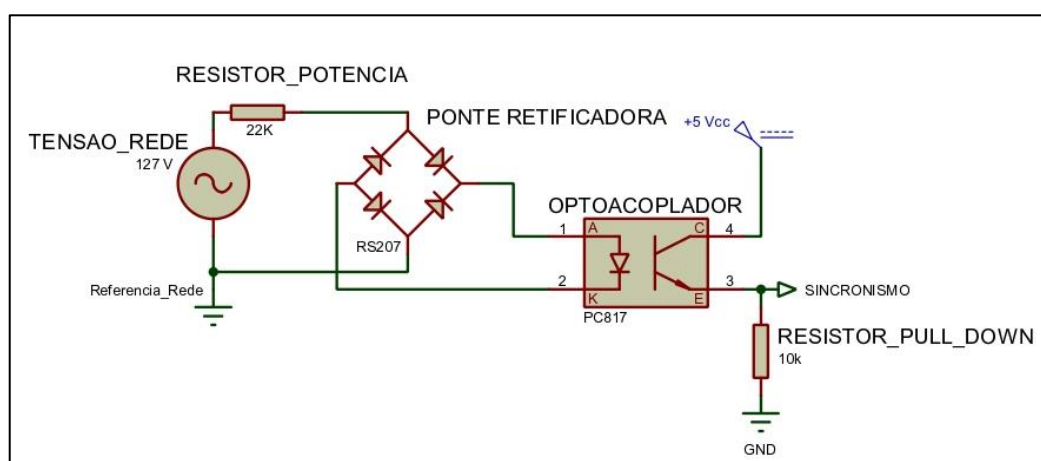
Assim, de acordo com a função descrita em código, conforme o valor mensurado de DO, variado entre 0.00 e 5.00, a saída na porta digital 11 do Arduino deverá ser inversamente proporcional e ele, variado entre 255 e 0. Estes bits, por sua vez, correspondem a uma variação de tensão entre 0 e 5 V, em que, 0 V é equivalente a ao bit 0 e 5 V, equivalente ao bit 255.

Em suma, a função map, presente no código, fará com que a intensidade da potência de saída da carga seja controlada conforme a necessidade demandada pelo reator. Permitindo que o controle seja feito de maneira mais precisa e ideal para o mantimento da estreita faixa de sobrevivência dos seres aeróbios.

3.2 Circuito de Sincronismo

O circuito detector de cruzamento por zero, responsável pela obtenção do sincronismo entre as ondas de tensão da rede com o sistema de controle, como descrito no Cap. 2.7, foi disposto da seguinte maneira. A Fig. 25 demonstra o circuito equivalente montado nesta etapa.

Figura 25 – Circuito de Sincronismo.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

O circuito em questão possui a função de gerar pulsos de tensão síncronos às passagens pelo zero das ondas de tensão alternadas da rede. Sua estrutura pode ser descrita da seguinte forma.

Conectada diretamente à rede, tem-se um resistor de 22 kΩ de resistência e 2 W de potência, com o intuito limitar a corrente de entrada do sistema.

De acordo com a Lei de Kirchoff das tensões, sabe-se que: (Alexander; Sadiku, 2013)

$$V_{in} = V_{bridge} + \Delta V + V_{LED} [V] \quad (7)$$

Sendo,

V_{in} - Tensão alternada eficaz de entrada da rede (127 V);

ΔV - Queda de tensão no resistor de potência;

V_{LED} - Queda de tensão máxima de entrada do Optoacoplador (datasheet PC817);

V_{bridge} - Queda de tensão da ponte retificadora (datasheet RS207).

Logo:

$$127 = \Delta V + 1,4 + 1,0 \quad (8)$$

$$\Delta V = 127 + 1,4 + 1,0 \quad (9)$$

$$\Delta V = 124,6 V \quad (10)$$

Sabendo disso, calcula-se a corrente de entrada do Optoacoplador:

$$I_{LED} = \frac{\Delta V[V]}{R[\Omega]} \quad (11)$$

$$I_{LED} = \frac{124,6}{22000} = 5,663 mA \quad (12)$$

Além disso, pode-se obter também a potência dissipada no resistor da seguinte maneira:

$$P_R = \frac{\Delta V^2[V]}{R[\Omega]} \quad (13)$$

$$P_R = \frac{124,6^2}{22000} = 0,706 \text{ W} \quad (14)$$

Logo, dados os resultados das Eq. 10 e 12 e tendo em vista que, de acordo com o datasheet do PC817, a corrente de entrada do Optoacoplador deverá ser menor ou igual a 50 mA, o resistor de potência escolhido está adequadamente dimensionado ao sistema.

3.3 Circuito Gerador de Onda PWM

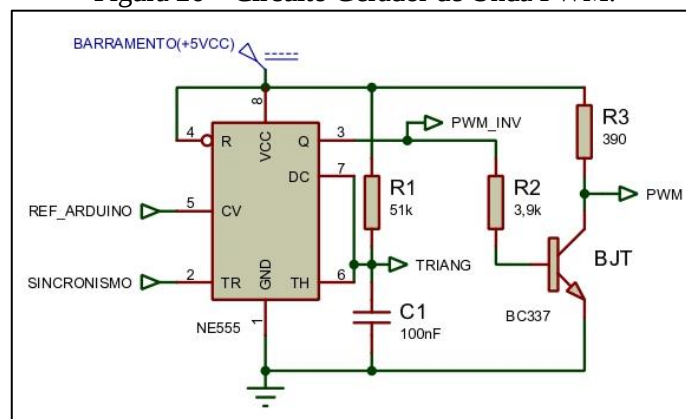
Posteriormente ao circuito de sincronismo, tem-se o circuito gerador de onda PWM, o qual será responsável por gerar os pulsos cíclicos de ondas quadradas que serão sequencialmente utilizadas para o controle de gatilhamento do conversor CA-CA.

Assim como descrito no Cap. 3.1, o sinal de referência para a modulação PWM do conversor em questão será o valor de tensão CC (0 a 5 V) oriundo da saída digital do Arduino, cuja intensidade estará diretamente relacionada à demanda de oxigênio dissolvido por parte do reator químico.

Por sua vez, sabendo que para que haja uma modulação PWM é indispensável a presença de outros dois parâmetros: uma onda de tensão triangular e um dispositivo comparador. Com isso, tem-se que, para a geração da onda triangular, bem como a inserção do componente comparador ao sistema, utiliza-se CI NE555N com o modo de operação monoestável.

Baseado na arquitetura de montagem expressa em bibliografia, para o circuito do conversor foi dimensionada a seguinte disposição da Fig. 26:

Figura 26 – Circuito Gerador de Onda PWM.



Fonte: autor.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

Tal metodologia pode ser descrita da seguinte maneira:

Os pulsos de sincronismo gerados pelo circuito Zero Cross e conectados ao pino 2 (Trigger) do 555 garantem que os ciclos de temporização do sinal PWM sejam síncronos às ondas de tensão da rede. Estes devem possuir o dobro da frequência de oscilação de entrada (120 Hz) e, portanto, metade do período da mesma (8,33 ms).

O sinal de referência provindo do Arduino, por sua vez, é enviado ao pino 5 (Control Voltage) do CI. Desta forma, o controle da razão cíclica da modulação PWM é realizado diretamente através da amplitude deste mesmo sinal.

Além disso, a conexão entre a porta do Arduino e o 555 não é realizada de maneira direta. Entre eles há um circuito RC responsável pela filtragem da tensão contínua de referência, já que esta, por se tratar de um sinal PWM efetuado pelo próprio microcontrolador do Arduino e transmitido pela saída digital do mesmo, há naturalmente a presença de ruídos e harmônicos gerados nessa modulação. Assim, a fim de se garantir a maior precisão no sistema de controle, torna-se indispensável a realização dessa filtragem.

Para isso, utiliza-se um resistor com 220 Ω de resistência, em paralelo com um capacitor de 100 μF de capacitância. Assim, a frequência de corte desse filtro pode ser calculada da seguinte forma.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 220 \times 100 \times 10^{-6}} \quad (16)$$

$$f_c = \frac{1}{0,382300768} \quad (17)$$

$$f_c = 7,234 \text{ Hz} \quad (18)$$

Ademais, a fim de se obter a onda triangular dente de serra característico do modo de operação monoestável do CI 555, tem-se o circuito RC externo conectado da seguinte maneira. Um resistor de 51 k Ω de resistência, ligado em série entre os pinos 8 (Vcc) e 6 (Threshold), este último, por sua vez, interligado ao pino 7 (Discharge). Por fim, um capacitor cerâmico de 100 nF de capacitância, conectado em shunt a esse mesmo ponto e ligado à referência do sistema.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

Calcula-se, assim, o período de tempo (T) máximo de permanência do nível lógico alto de saída para o modo de operação monoestável, com base na Eq. 5.

$$T = 1,1 \times 51 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-9} \quad (19)$$

$$T = 5,61 \text{ ms} \quad (20)$$

Como sequência ao circuito, devida a configuração do sistema e ao modo de operação do 555, a modulação obtida na saída 3 (Out) do mesmo se configura como uma onda quadrada invertida em relação à PWM necessária para a aplicação do conversor. Isto é, se mantida essa forma, o circuito operaria de forma inversa ao planejado inicialmente, aumentando a potência da bomba de ar quando se deveria diminuir e vice-versa.

Assim, para evitar isso, deve-se confeccionar um circuito que inverta essa saída, de modo que se mantenham adequadamente todos os parâmetros de razão-cíclica e período da PWM.

Visando esses pontos, na saída do pino 3 do CI, foi configurado um circuito inversor utilizando dois resistores e um transistor bipolar de junção NPN de modelo BC337. Desta forma, fazendo com o que circuito garanta que, enquanto houver tensão não nula na base do BJT (saída 3 em nível lógico alto), este se encontrará em condução, descarregando ao GND a tensão 5 V presente em seu coletor e consequentemente mantendo a saída inversora em nível lógico baixo (0 V). Da mesma maneira, enquanto houver tensão nula na base do BJT (saída 3 em nível lógico baixo), o transistor se encontrará em estado de corte, descarregando a tensão de seu coletor à saída inversora, mantendo-a em nível lógico alto (5 V).

Portanto, em parâmetros digitais (0 e 1), tem-se que, para todo instante em que a saída do 555 se encontrar em 1, a saída inversora se encontrará em 0, valendo também o seu caso inverso.

3.4 Circuito de Acionamento do Conversor CA-CA

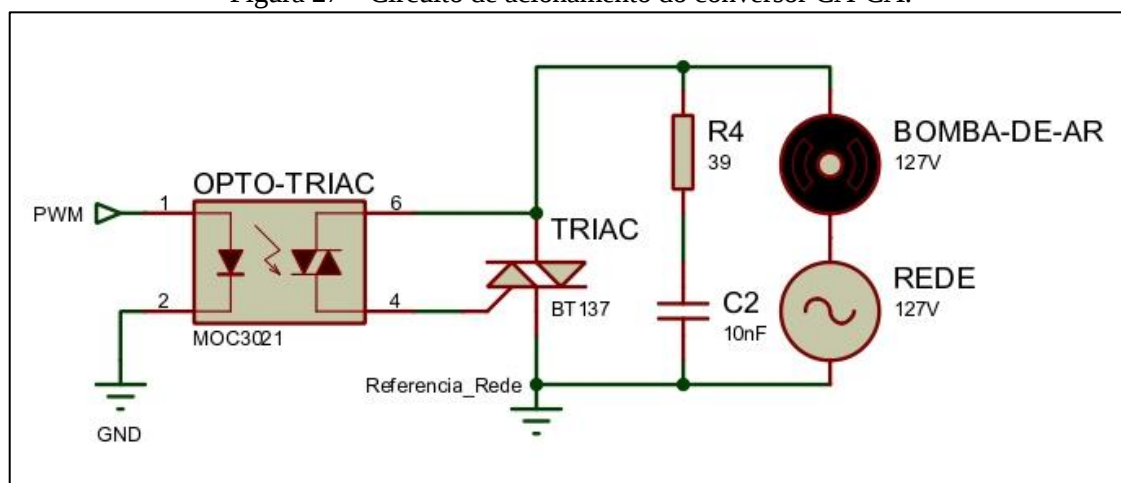
Após a obtenção dos pulsos modulados, tem-se a etapa de acionamento do conversor CA-CA (gradador), a qual utiliza das ondas PWM para determinar de maneira cíclica quando deverão ser feitos os “recortes” à onda de tensão na carga. Sendo, neste caso, controlado digital e automaticamente e tendo como seu principal componente de atuação, o TRIAC.

CAPÍTULO 3 – Sistema Proposto

Rashid (2014, p. 473) diz que “Se uma chave com tiristor for conectada entre uma alimentação CA e a carga, o fluxo de potência poderá ser controlado variando-se o valor rms da tensão CA aplicada sobre a carga. Esse tipo de circuito de potência é conhecido como controlador de tensão CA.[...] No controle liga-desliga, as chaves (tiristores) conectam a carga à alimentação CA por alguns ciclos da tensão de entrada e, em seguida, a desconectam por alguns ciclos. No controle do ângulo de fase, as chaves conectam a carga à alimentação CA durante uma parte de cada ciclo da tensão de entrada.”

Sua disposição se dá da seguinte forma na Fig. 27:

Figura 27 – Circuito de acionamento do conversor CA-CA.



Fonte: autor.

Nesse arranjo, tem-se primeiramente um Opto TRIAC, de modelo MOC3021, com o intuito de isolar o sistema de potência com o eletrônico, assim como feito anteriormente com o Opto acoplador. Em seguida, após a saída do MOC, os terminais são interligados ao TRIAC, de modelo BT137, que por sua vez, é o componente responsável pelo gatilhamento dos recortes da onda de tensão na carga.

Seus terminais 1 e 2, sendo o anodo e catodo, respectivamente, devem fechar um circuito em série com a carga e a rede, enquanto seu pino 3, o gatilho, deve receber comando provindos do opto os quais são determinados pela onda PWM anteriormente gerada.

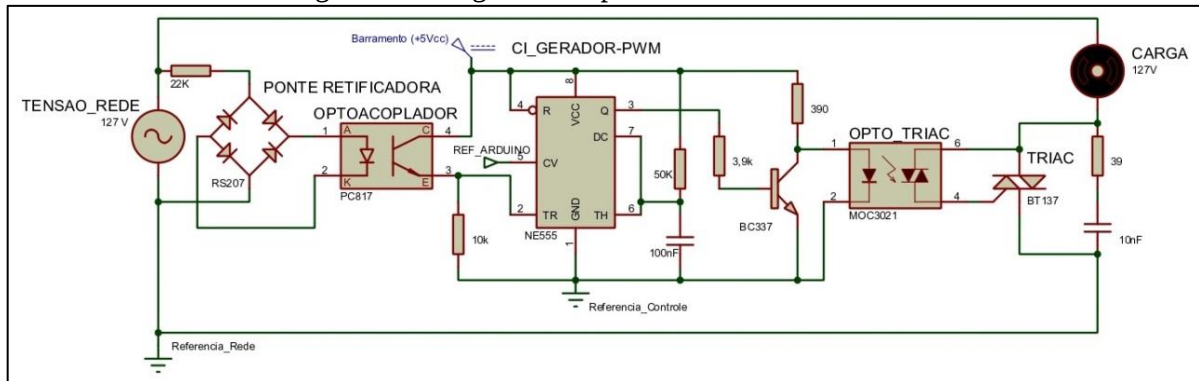
Ademais, em paralelo a estes, foi posicionado um circuito snubber, utilizando um resistor de potência de 39 Ω de resistência, em série com um capacitor de poliéster 10nF de capacitância, a fim de se amortecer o circuito e limitar os picos de tensão que possa vir a gerar durante os chaveamentos (Scherz; Monk, 2016).

4 RESULTADOS

4.1 Simulação

Ao final de todas as etapas de simulação, obtém-se o seguinte diagrama completo com todos os circuitos do conversor demonstrado pela Fig. 28:

Figura 28 – Diagrama completo do conversor CA-CA.



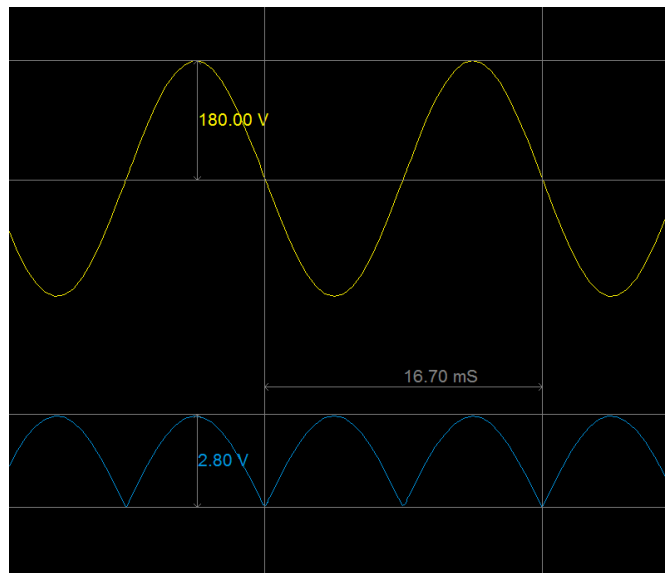
Fonte: autor.

Para cada uma das etapas da simulação foram obtidos os seguintes resultados.

4.1.1 Circuito de Sincronismo

As Fig. 29 e 30 demonstram os resultados obtidos pelo circuito de sincronismo.

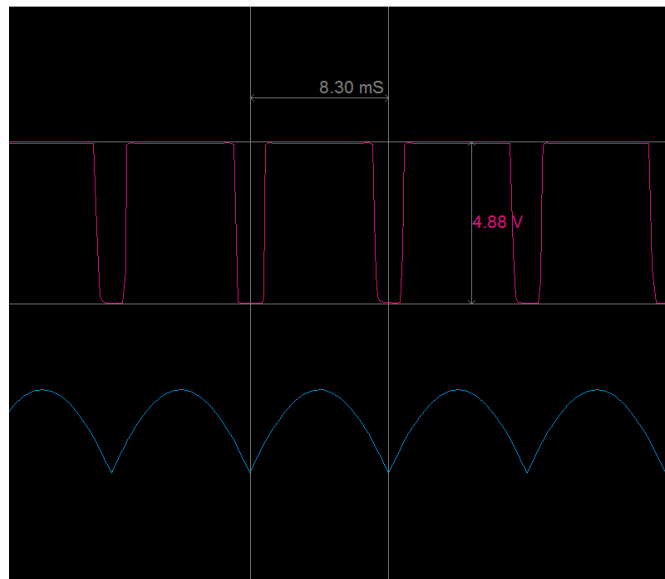
Figura 29 – Ondas de tensão na entrada (em amarelo) e retificada (em azul) obtidas na simulação.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Figura 30 – Onda de tensão retificada (em azul) e pulsos de sincronismo (em rosa) obtidos na simulação.



Fonte: Autor.

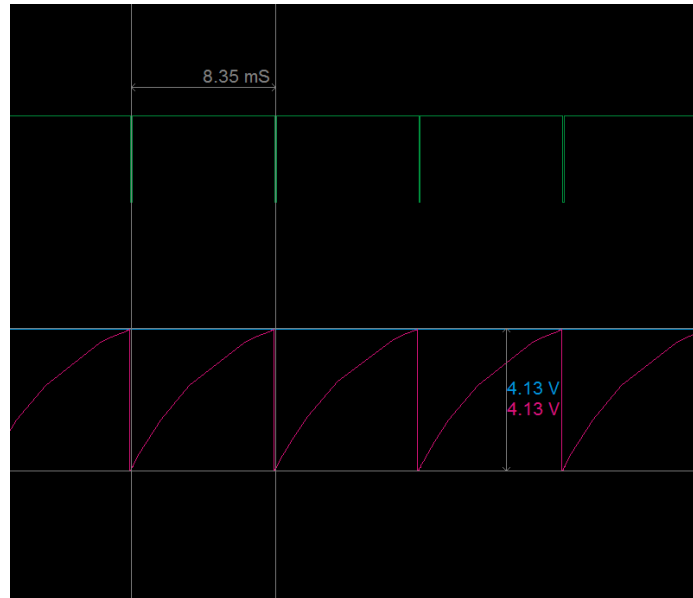
Observa-se, por meio das Fig. 29 e 30 que, o pulso de sincronismo pode ser obtido através da saída do emissor do fototransistor interno ao optoacoplador. Sua configuração se dá por meio de uma fonte de tensão V_{cc} de 5 V, provinda do barramento de tensão do Arduino, conectada diretamente ao coletor do opto, enquanto que o emissor do mesmo se encontra aterrado através de um resistor pull-down de 10 k Ω .

Essa disposição garante que, para todo momento em que houver valor de tensão não nulo na entrada, isto é, enquanto houver corrente elétrica alimentando o LED do PC817, o fototransistor do mesmo estará conduzindo corrente e, portanto, a saída conectada ao emissor do componente estará submetida à tensão máxima do barramento (próxima de 5 V). Por sua vez, nos instantes em que a onda de tensão retificada cruzar o ponto zero, isto é, enquanto o LED não estiver conduzindo corrente, o fototransistor entrará em estado de corte e o sistema garantirá que a tensão de saída, conectada ao emissor, seja igual à referência (GND). Fazendo assim, com que sejam gerados pulsos de tensão (0 V) síncronos com os cruzamentos pelo ponto zero das ondas de tensão da rede.

4.1.2 Circuito Gerador de Onda PWM

As Fig. 31 a 33 demonstram os resultados obtidos pelo circuito Gerador de Onda PWM.

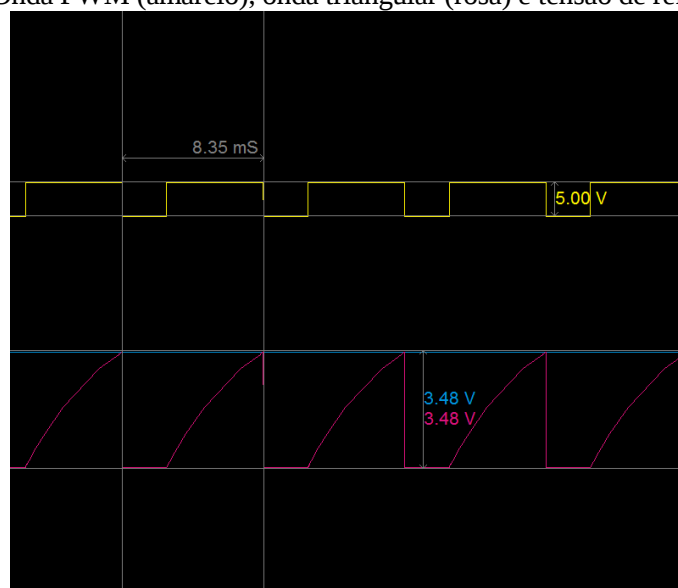
Figura 31 – Pulso de sincronismo (verde), onda triangular (rosa) e tensão de referência (azul).



Fonte: autor.

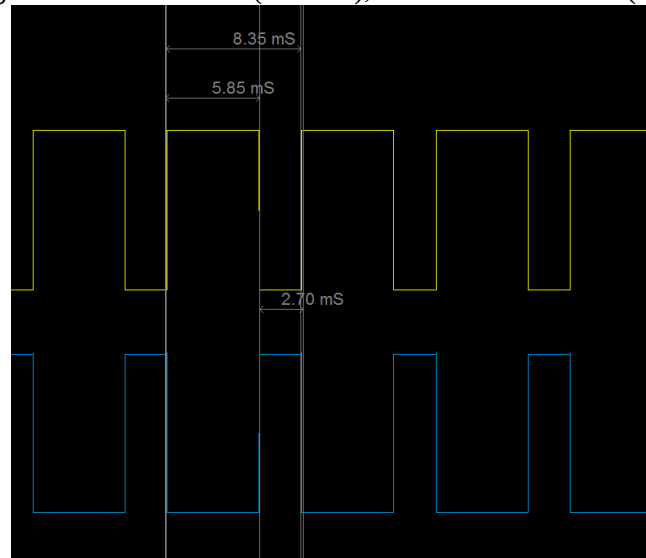
Dados os resultados, utilizando o próprio CI como comparador da onda triangular e do sinal de referência, pode-se obter, através da saída no pino 3 (out), a modulação PWM necessária para o conversor.

Figura 32 – Onda PWM (amarelo), onda triangular (rosa) e tensão de referência (azul).



Fonte: autor.

Figura 33 – Onda PWM (amarelo), onda PWM invertida (azul).



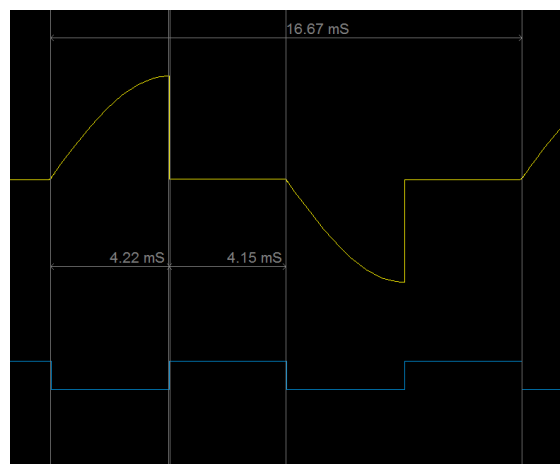
Fonte: autor.

Apenas para fins didáticos, na Fig. 33 foi nomeada a onda PWM azul como invertida. Porém, a partir deste ponto, considera-se a onda PWM até então invertida como somente PWM, tendo em vista que, a configuração atual da mesma se trata do sentido correto para a utilização do conversor.

4.1.3 Circuito de Acionamento do Conversor CA-CA

A Fig. 34 demonstra os resultados obtidos pelo circuito de acionamento do conversor CA-CA.

Figura 34 – Onda de tensão na carga (amarelo) e gatilho de acionamento (azul).



Fonte: autor.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Com base nesse resultado, observa-se que o conversor de tensão CA atua de maneira condizente aos valores teóricos abordados, bem como realiza os devidos cortes de tensão em função das ondas de acionamento obtidas pelo circuito PWM.

4.2 Montagem

Depois de obtidos todos os resultados das simulações, tem-se a etapa da montagem do conversor CA-CA, responsável por receber sinais de referência gerados pelo Arduino e assim, modular completamente as ondas de tensão provindas da rede para finalmente aplica-las à carga. Este, por sua vez, foi confeccionado em formato de placa de circuito impresso, trilhada em cobre.

Para isso, primeiramente foi realizada toda a montagem do desenho do circuito prático da placa através do software Microsoft Visio, o qual permite criar diagramas visuais e assim, posteriormente imprimi-los quando necessário.

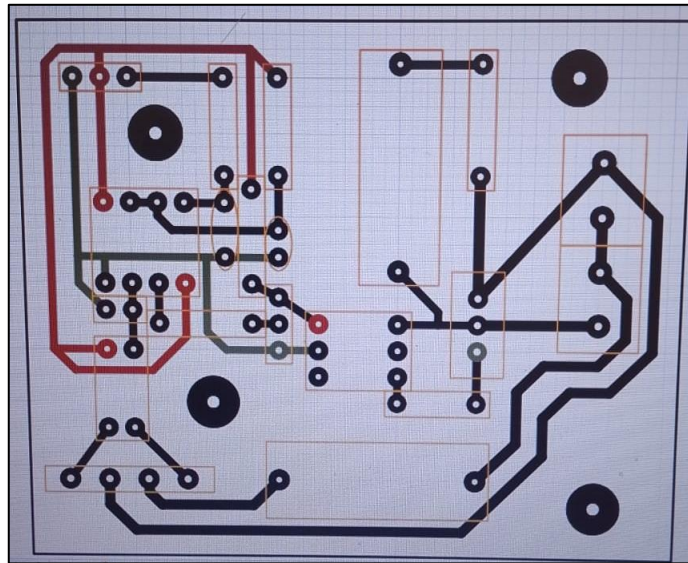
Em seguida, foi realizada a impressão do circuito em papel fotográfico e posteriormente projetada, através de pressão e calor, a uma placa composta inteiramente por cobre. Com isso, obteve-se um molde metálico com delineamentos de tinta no formato do circuito confeccionado, para que, posteriormente fosse realizado o último processo: a oxidação.

Utilizando uma quantia adequada de solução aquosa de percloroeto de ferro e em função do tempo, todo conteúdo metálico em cobre da placa, que não houver tido contato com a tinta, logo se oxida. Desta forma, ao final do processo, mantêm-se intacto somente as trilhas de cobre as quais foram anteriormente desenhadas e moldadas para as devidas conexões dos componentes eletrônicos do conversor (Campos, 2022).

A Fig. 35 ilustra a modelagem da placa realizada pelo software.

CAPÍTULO 4 – Resultados

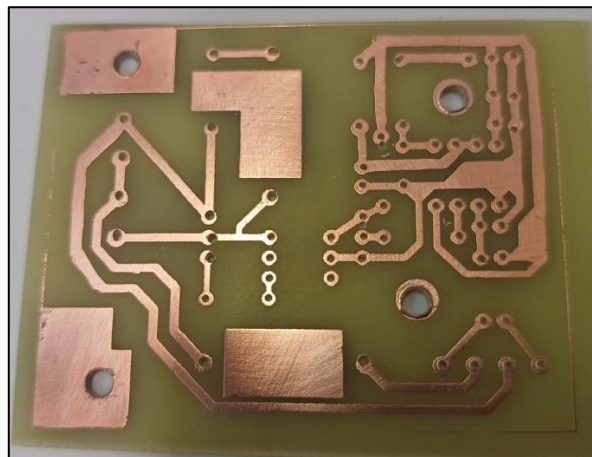
Figura 35 – Ilustração dos circuitos da placa realizada através do Microsoft Visio.



Fonte: Autor.

As Fig. 36 e 37 demonstram os circuitos impressos da placa confeccionada e o produto final contendo a soldagem de todos os componentes, respectivamente.

Figura 36 – Placa eletrônica confeccionada.



Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Figura 37 – Produto final do conversor CA-CA confeccionado.



Fonte: Autor.

Por fim, como carga do sistema e responsável pela inserção de oxigênio dentro do fluido presente no reator, tem-se o compressor de ar de fabricante e modelo Risheng RS-2800. Seus terminais, por sua vez, ao invés de estarem conectados diretamente à fonte de alimentação 127 V, como comumente se utiliza, foram conectados diretamente aos terminais reservados pelo conversor. Desta forma, utilizando o gradador como uma fonte intermediária entre o compressor e a rede. A Fig. 38 demonstra o compressor de ar utilizado em projeto.

Figura 38 – Compressor de ar Risheng RS-2800.



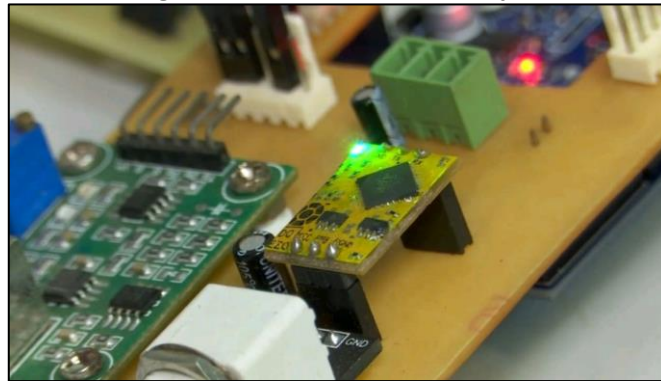
Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Após a confecção da placa contendo todos os circuitos do controlador, os resultados obtidos o pelo ensaio prático do sistema de controle condisseram com os alcançados pela simulação e a onda de tensão alternada e digitalmente controlada garantiu a eficiência do conversor CA-CA.

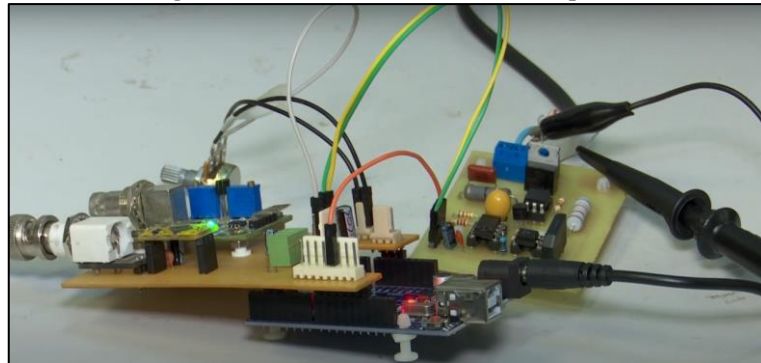
As Fig. 39 e 40 demonstram os o sensor DO em atuação e o sistema todo completo contendo o sensoramento, o Arduino e a placa confeccionada.

Figura 39 – Sensor DO em atuação.



Fonte: autor

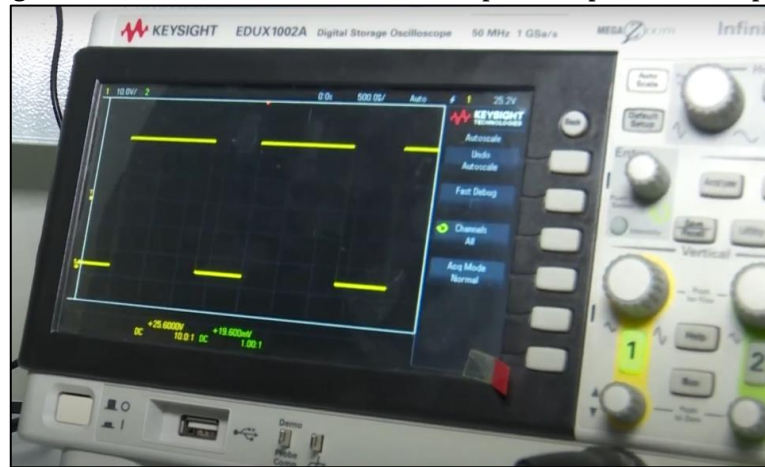
Figura 40 – Sistema de controle completo.



Fonte: autor

As Fig. 41 e 42 demonstram os resultados obtidos pelo osciloscópio.

Figura 41 – Resultados das ondas PWM capturados pelo osciloscópio.



Fonte: autor

Figura 42 – Resultados da onda de tensão na carga capturados pelo osciloscópio.



Fonte: autor

CAPÍTULO 4 – Resultados

Ademais, todos os resultados obtidos na experimentação foram mapeados e processados, obtendo as seguintes relações:

Tabela 6 – Resultados experimentais do conversor CA-CA.

N	t _{up} (s) [PWM]	t _{down} (s) [PWM]	Razão Cíclica	VL (V)	Ang. (°)	Ang. (rad)
0	0	0,008333333	0,00	0,00	180	3,141592654
1	0,000094	0,008239333	0,01	0,74	177	3,089232776
2	0,000105	0,008228333	0,01	0,74	177	3,089232776
3	0,0001125	0,008220833	0,01	0,74	177	3,089232776
4	0,00012	0,008213333	0,01	0,74	177	3,089232776
5	0,0001275	0,008205833	0,02	0,74	177	3,089232776
6	0,0003125	0,008020833	0,04	1,60	175	3,054326191
7	0,000365	0,007968333	0,04	2,10	174	3,036872898
8	0,0004175	0,007915833	0,05	2,70	173	3,019419606
9	0,0004725	0,007860833	0,06	3,35	171	2,984513021
10	0,000525	0,007808333	0,06	4,00	170	2,967059728
11	0,0005775	0,007755833	0,07	4,80	169	2,949606436
12	0,0006325	0,007700833	0,08	5,60	168	2,932153143
13	0,0006875	0,007645833	0,08	6,30	167	2,914699851
14	0,0007425	0,007590833	0,09	7,40	166	2,897246558
15	0,0007975	0,007535833	0,10	8,05	165	2,879793266
16	0,000855	0,007478333	0,10	9,00	163	2,844886681
17	0,0009125	0,007420833	0,11	9,93	162	2,827433388
18	0,00097	0,007363333	0,12	10,90	161	2,809980096
19	0,00102	0,007313333	0,12	12,00	160	2,792526803
20	0,00109	0,007243333	0,13	13,00	159	2,775073511
21	0,00115	0,007183333	0,14	14,60	157	2,740166926
22	0,0012	0,007133333	0,14	15,30	156	2,722713633
23	0,00126	0,007073333	0,15	17,00	155	2,705260341
24	0,00132	0,007013333	0,16	18,30	153	2,670353756
25	0,00138	0,006953333	0,17	19,00	152	2,652900463
26	0,00144	0,006893333	0,17	20,10	151	2,635447171
27	0,0015	0,006833333	0,18	21,30	150	2,617993878
28	0,00156	0,006773333	0,19	22,70	149	2,600540585
29	0,00162	0,006713333	0,19	24,00	148	2,583087293
30	0,00169	0,006643333	0,20	25,50	146	2,548180708
31	0,00174	0,006593333	0,21	26,70	145	2,530727415

CAPÍTULO 4 – Resultados

32	0,00181	0,006523333	0,22	29,10	143	2,49582083
33	0,00188	0,006453333	0,23	29,60	142	2,478367538
34	0,00194	0,006393333	0,23	31,10	141	2,460914245
35	0,00201	0,006323333	0,24	32,60	140	2,443460953
36	0,00207	0,006263333	0,25	35,20	138	2,408554368
37	0,00214	0,006193333	0,26	36,00	137	2,391101075
38	0,0022	0,006133333	0,26	37,30	136	2,373647783
39	0,00227	0,006063333	0,27	38,80	135	2,35619449
40	0,00234	0,005993333	0,28	40,80	133	2,321287905
41	0,0024	0,005933333	0,29	42,20	132	2,303834613
42	0,00247	0,005863333	0,30	43,90	130	2,268928028
43	0,00254	0,005793333	0,30	45,60	129	2,251474735
44	0,00262	0,005713333	0,31	48,70	126	2,199114858
45	0,00269	0,005643333	0,32	50,50	125	2,181661565
46	0,00276	0,005573333	0,33	50,80	124	2,164208272
47	0,00284	0,005493333	0,34	52,50	123	2,14675498
48	0,00291	0,005423333	0,35	54,80	121	2,111848395
49	0,00298	0,005353333	0,36	57,80	119	2,07694181
50	0,00306	0,005273333	0,37	59,10	118	2,059488517
51	0,00313	0,005203333	0,38	60,00	117	2,042035225
52	0,0032	0,005133333	0,38	61,70	115	2,00712864
53	0,00329	0,005043333	0,39	63,60	114	1,989675347
54	0,00336	0,004973333	0,40	65,60	112	1,954768762
55	0,00344	0,004893333	0,41	67,50	110	1,919862177
56	0,00353	0,004803333	0,42	69,40	109	1,902408885
57	0,0036	0,004733333	0,43	71,00	107	1,8675023
58	0,00368	0,004653333	0,44	73,20	105	1,832595715
59	0,00377	0,004563333	0,45	75,90	103	1,79768913
60	0,00385	0,004483333	0,46	77,90	101	1,762782545
61	0,00395	0,004383333	0,47	79,00	100	1,745329252
62	0,00403	0,004303333	0,48	82,60	97	1,692969374
63	0,0041	0,004233333	0,49	84,60	95	1,658062789
64	0,0042	0,004133333	0,50	86,40	93	1,623156204
65	0,00428	0,004053333	0,51	88,00	92	1,605702912
66	0,00438	0,003953333	0,53	90,20	90	1,570796327
67	0,00445	0,003883333	0,53	92,00	88	1,535889742
68	0,00457	0,003763333	0,55	93,10	87	1,518436449

CAPÍTULO 4 – Resultados

69	0,00465	0,003683333	0,56	95,70	84	1,466076572
70	0,00475	0,003583333	0,57	97,50	82	1,431169987
71	0,00482	0,003513333	0,58	99,40	80	1,396263402
72	0,00493	0,003403333	0,59	101,00	78	1,361356817
73	0,00503	0,003303333	0,60	103,00	75	1,308996939
74	0,00512	0,003213333	0,61	105,00	73	1,274090354
75	0,00525	0,003083333	0,63	106,00	72	1,256637061
76	0,00535	0,002983333	0,64	108,00	69	1,204277184
77	0,00545	0,002883333	0,65	109,00	68	1,186823891
78	0,00555	0,002783333	0,67	110,00	66	1,151917306
79	0,00565	0,002683333	0,68	111,00	65	1,134464014
80	0,00575	0,002583333	0,69	113,00	62	1,082104136
81	0,00585	0,002483333	0,70	115,00	58	1,012290966
82	0,00595	0,002383333	0,71	116,00	56	0,977384381
83	0,0061	0,002233333	0,73	117,00	54	0,942477796
84	0,0062	0,002133333	0,74	118,00	52	0,907571211
85	0,00632	0,002013333	0,76	119,00	50	0,872664626
86	0,00642	0,001913333	0,77	120,00	48	0,837758041
87	0,00655	0,001783333	0,79	121,00	45	0,785398163
88	0,00668	0,001653333	0,80	122,00	42	0,733038286
89	0,0068	0,001533333	0,82	122,00	40	0,698131701
90	0,00693	0,001403333	0,83	123,00	39	0,680678408
91	0,00705	0,001283333	0,85	124,00	35	0,610865238
92	0,0072	0,001133333	0,86	125,00	31	0,541052068
93	0,00733	0,001003333	0,88	125,00	28	0,488692191
94	0,00745	0,000883333	0,89	126,00	24	0,41887902
95	0,00758	0,000753333	0,91	126,00	22	0,383972435
96	0,00773	0,000603333	0,93	126,50	19	0,331612558
97	0,00788	0,000453333	0,95	126,80	14	0,244346095
98	0,00803	0,000303333	0,96	126,90	11	0,191986218
99	0,00818	0,000153333	0,98	126,97	7	0,122173048
100	0,00833333	0	1,00	127,00	0	0

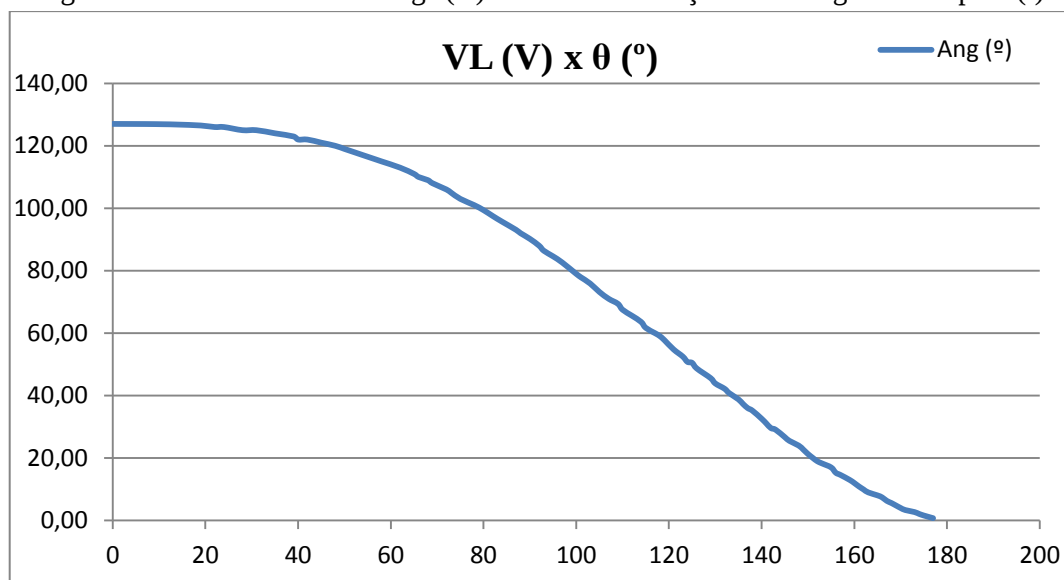
Fonte: autor.

Sendo t_{up} e t_{down} o tempo, em segundos, de nível lógico alto e baixo da onda PWM gerada, respectivamente; V_L , a tensão eficaz obtida na carga; Ang (°) e Ang (rad), os ângulos de disparo de gatilho do TRIAC em graus e radianos, respectivamente.

CAPÍTULO 4 – Resultados

Com base nesses resultados, através da Fig. 43 pode-se observar a relação entre os parâmetros de tensões na carga e o ângulo de disparo do conversor:

Figura 43 – Tensão eficaz na carga (V) x Gráfico da relação entre Ângulo de disparo (°).



Fonte: autor.

Portanto, os resultados corroboram para uma eficácia na relação entre a abordagem teórica e a prática, uma vez que os gráficos formados experimentalmente comprovam a não linearidade da relação entre os parâmetros elétricos do sistema, bem como comprovam a relação entre ângulo de disparo e tensão na carga expressada na Eq. 6.

Durante toda a abordagem experimental realizada ao longo da pesquisa, foi possível se obter êxito em duas vertentes abordadas: possibilitou-se a automatização dos processos de mantimento do ambiente vital do reator para os micro-organismos e, além disso, possibilitou-se a realização de um método de controle automático utilizando um Arduino Uno, sem que haja a necessidade da utilização de funções internas ao microcontrolador do mesmo, como por exemplo, os timers e interrupções.

Tendo em vista a sua praticidade, os resultados experimentais permitiram que se fossem automatizados todos os processos relacionados ao controle dos parâmetros vitais para a sobrevivência dos micro-organismos no reator químico: pH, temperatura, taxa de oxigênio e nível. Já que, com a confecção da placa eletrônica contendo o conversor, foi possível se realizar

CAPÍTULO 4 – Resultados

toda a automação do processo de controle de oxigênio utilizando o mínimo possível de portas digitais do Arduino, deixando mais espaços livres para as outras funcionalidades.

Além disso, pode-se dizer que, a maior vantagem da aplicação deste tipo de controlador digital em conjunto com o Arduino Uno está na não necessidade de utilização de funções como interrupções para a realização de seus processos. Pois, tendo em vista que, com a utilização dessas funcionalidades intrínsecas ao microcontrolador, apesar de parecer o método mais fácil de abordagem, elas acabam impossibilitando o sistema de realizar várias outras leituras ao mesmo tempo, enquanto a interrupção está operando.

Isso se dá, pois, a cada vez que se realiza uma interrupção em um microcontrolador, há um desvio em seu fluxo de operação, a fim de que sejam realizados à parte os comandos de desvio, para que assim, posteriormente, ele retorne ao código principal e continue o fluxograma como foi programado. Portanto, no caso um sistema que necessite de leituras e comunicações constantes ou, até então, com intervalos de tempo muito curtos entre uma leitura e outra, os desvios de interrupção acabam prejudicando o funcionamento adequado de todo o sistema. (Atmel, 2015).

Levando em conta esse obstáculo, todo o sistema de controle foi desenvolvido para não depender do uso de interrupções nem da reserva de timers do microcontrolador do Arduino para o seu devido funcionamento.

5 CONCLUSÃO

Pode-se dizer que, o controle de tensão CA utilizando um conversor CA-CA se trata de um método fácil e conveniente para o manuseio de potência fornecida à carga, quando esta for puramente resistiva ou então sensível à variação de tensão CA. Assim, quando atrelado ao controle digital e automatizado através de componentes relativamente baratos e de fácil programação, é possível se realizar complexas tarefas, tanto cotidianas quanto industriais, de uma forma simples e prática.

Portanto, o conversor se mostrou ser uma opção eficiente e viável para o controle automático de oxigênio dissolvido no reator químico. Ademais, a integração com um Arduino Uno para o manuseio de dados permitiu a atuação de um controle mais preciso, sendo capaz de monitorar e ajustar a dosagem de oxigênio devidamente conforme as necessidades do processo.

Por fim, o uso de componentes acessíveis e de fácil programação também possibilitou a realização de um projeto com baixo custo e alta funcionalidade, demonstrando o potencial de soluções simples e eficientes para várias outras aplicações industriais com plantas semelhantes à apresentada.

REFERÊNCIAS

Acqua Nativa Monitoramento Ambiental; Disponível em: <https://www.acquanativa.com.br/aplicacoes/como-medir-od-com-arduino.html>; Acesso em 31 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Resolução ANA n. 187**. Estabelece que a disposição final dos resíduos deve ser feita em aterros sanitários, de acordo com critérios técnicos e normas operacionais. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/187>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ATMEL. **Datasheet do ATMEGA328P**. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 19 nov. 2024.

CAMPOS, S. P. **Protótipo para corrosão otimizada de placas de circuito impresso utilizando solução aquosa de percloro de ferro**. Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4043>. Acesso em: 05 nov. 2024.

CORDERO, R.; SOARES, J. L.; PADILLA, R. Y. C. Sistema de controle de reator aeróbio contínuo usando Arduino. **Peer Review**, Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, v. 5, n. 21, p. 661–674, out. 2023. DOI: 10.53660/1158. Disponível em: <https://peerw.org/index.php/journals/article/view/1158>. Acesso em: 29 ago. 2024.

FAIRCHILD: SEMICONDUCTOR. **Datasheet do NE555N**. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/53590/FAIRCHILD/NE555N.html>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FIORUCCI, A. R.; BENEDETTI FILHO, E. **A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos**. Química e Sociedade. Dourados: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, p. 10–16, mar. 2005. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc22/a02.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2024.

GROUP SHARP CORPORATION. **Datasheet do Optoacoplador PC817**. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/43368/SHARP/PC817.html>. Acesso em: 29 out. 2024.

KUGELSTADT, T. **Chapter 16: Active Filter Design Techniques**. Dallas. Disponível em: <https://www2.seas.gwu.edu/~ece121/Spring-11/filterdesign.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica**. Tradução: Antonio Pertence Jr. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016. v. 1. Disponível em: https://www.academia.edu/59857494/Eletronica_Vol_1_8Ed_Malvino. Acesso em: 18 nov. 2024.

MALVINO, A.; BATES, D. **Eletrônica**. Tradução: Antonio Pertence Jr. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016. v. 2. Disponível em: https://www.academia.edu/59857500/Eletronica_Vol_2_8Ed_Malvino. Acesso em: 18 nov. 2024.

PADILLA, R. Y. C.; SOARES, J. L. **Integração dos parâmetros de controle de um reator contínuo**. Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2023. *E-book*.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 29 out. 2024.

PRESS, J.; PRESS, N. **Datasheet do Sensor EZO-DO**. Disponível em: https://files.atlas-scientific.com/DO_EZO_Datasheet.pdf. Acesso em: 1 nov. 2024.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**: Dispositivos, circuitos e aplicações. Tradução: Leonardo Abramowicz. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. Disponível em: <https://dokumen.pub/eletronica-de-potencia-dispositivos-circuitos-e-aplicacoes-4nbsped-9788543005942-9788543014524.html>. Acesso em: 18 nov. 2024.

RÊGO SEGUNDO, A. K.; ROGRIGUES, C. L. C. **Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos**. 1. ed. Ouro Preto: Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, 2015. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 29 out. 2024.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2013. Disponível em: <https://archive.org/details/FundamentosDeCircuitosEltricosSadiku5EdioCompleto>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SANTOS, C. R. B. dos; SILVA, M. H. V.; CAMARGOS, A. F. P. de. **Conversor CA-CA de baixo custo utilizando Arduino e optoacopladores para detecção de zero**. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2019. *E-book*. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo_328.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

SCHERZ, P.; MONK, S. **Practical Eletronic for inventors**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill Education, 2016. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/427072711/Restart>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SECOS: ELEKTRONISCHE BAUELEMENTE. **Datasheet da ponte retificadora RS207**. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/278883/SECOS/RS201.html>. Acesso em: 31 out. 2024.

Tera Ambiental; 22/07/2021; Disponível em: Acesso em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/350779/conheca-os-danos-causados-pelos-efluentes-nao-tratados>; 29 out. 2024.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** v. 1. London: IWA Publishing, 2005. *E-book*. Disponível em: <https://iwaponline.com/ebooks/book/131/Biological-Wastewater-Treatment-in-Warm-Climate?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 29. nov. 2024.

ANEXO A — Códigos de programação do sensor DO no Arduino IDE.

```
#include <SoftwareSerial.h>

#define rx 2
#define tx 3
#define ref 11

SoftwareSerial myserial(rx, tx);

String inputstring = "";
String sensorstring = "";
boolean input_string_complete = false;
boolean sensor_string_complete = false;
float DO;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(ref, OUTPUT);
  myserial.begin(9600);
  inputstring.reserve(10);
  sensorstring.reserve(30);
}

void serialEvent() {
  inputstring = Serial.readStringUntil(13);
  input_string_complete = true;
}

void loop() {
  if (input_string_complete == true) {
    myserial.print(inputstring);
    myserial.print("\r");
```

```
inputstring = "";
input_string_complete = false;
}
if (myserial.available() > 0) {
    char inchar = (char)myserial.read();
    sensorstring += inchar;
    if (inchar == '\r') {
        sensor_string_complete = true;
    }
}
if (sensor_string_complete == true) {
    Serial.println(sensorstring);
    if (isdigit(sensorstring[0])) {
        DO = sensorstring.toFloat();
        if (DO >= 6.0) {
            Serial.println("high");
        }
        if (DO <= 5.00) {
            Serial.println("low");
        }
    }
    sensorstring = "";
    sensor_string_complete = false;
}
}
```