

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

FRANCO MARCHIORI LOUZADA

**TRANSMISSÃO DE DADOS POR VIBRAÇÕES EM
TUBULAÇÕES METÁLICAS**

**VITÓRIA
2022**

FRANCO MARCHIORI LOUZADA

TRANSMISSÃO DE DADOS POR VIBRAÇÕES EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Franco Marchiori Louzada, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Helder R. de O. Rocha
Coorientador: Prof. Dr. Jair A. L. Silva

VITÓRIA
2022

FRANCO MARCHIORI LOUZADA

TRANSMISSÃO DE DADOS POR VIBRAÇÕES EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Franco Marchiori Louzada, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 29 de março de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Helder Roberto de O. Rocha

Prof. Dr. Helder R. de O. Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Jair A. L. Silva

Prof. Dr. Jair A. L. Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Elizandra P R Coelho

Dra. Elizandra Pereira Roque Coelho
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Augusto Peterle

Eng. Augusto Cesar Federici Peterle
Vale S.A
Examinador

Aos meus pais, Elisabete e João Batista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela vida, pela oportunidade de estar escrevendo este trabalho e estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais e familiares, que me incentivaram e torceram pelo meu sucesso. Que apesar de todos os obstáculos, nunca cessaram em me apoiar e sustentar das mais diversas formas, sempre com carinho, paz e otimismo.

Aos meus amigos, os quais estiveram ao meu lado sempre contribuindo para o meu aprendizado, além de momentos de descontração, onde me auxiliaram muito nesses anos cansativos. Em especial, Bruno Novelli Bonela, Joelso Giovanelli, Letícia Assis, Marianne Marinho, Matheus Franco e Thais Marchesi.

Aos professores e servidores do Departamento de Engenharia Elétrica, que compartilharam comigo diversos conhecimentos e experiências.

À minha noiva, Simoni Monti Silva, que me incentivou nos momentos mais difíceis e compreendeu a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da 2Solve, que me apoiaram no desenvolvimento desse projeto sempre que necessário.

E também à Universidade Federal do Espírito Santo, por ser minha casa nos últimos anos, por todos os momentos em que vivi no campus Goiabeiras.

RESUMO

Desde a Terceira Revolução Industrial, se faz necessário o sensoriamento dos processos, para que se possa aplicar técnicas de automação nas plantas do sistema. Com esse estímulo, nas últimas décadas, ocorreram diversos avanços tecnológicos na área de microprocessadores, instrumentação para sensoriamento, microssistemas eletromecânicos e comunicação sem fio. Inicialmente, os sistemas de sensores operavam isolados ou comunicavam-se por redes cabeadas, o que exigia altos custos de implantação e manutenção. Várias tecnologias de comunicação por radiofrequência foram desenvolvidas para propor soluções. Entretanto, diversos desafios devem ser superados. Neste trabalho é apresentado o atual cenário de redes de sensores e alguns de seus obstáculos. Assim, é apresentada a proposta de usar a propagação de ondas mecânicas nas paredes de tubulações metálicas como um meio de comunicação para redes de sensores em curtas distâncias. A metodologia proposta prevê o uso de um *notebook* com o *software MATLAB* para realizar a modulação e demodulação dos dados transmitidos e o emprego de sensores piezoelétricos para capturar as ondas mecânicas propagadas na tubulação.

Palavras-chave: IoT. Telecomunicações. Sensores. Vibrações.

ABSTRACT

Since the Third Industrial Revolution, it is necessary to sensing the processes, so automation techniques can be applied in the plants of the system. With this stimulus, in recent decades, there have been several technological advances in the area of microprocessors, instrumentation for sensing, electromechanical microsystems and wireless communication. Initially, sensor systems operated isolated or communicated through wired networks, which required high deployment and maintenance costs. Several radio frequency communication technologies have been developed to propose solutions. However, several challenges must be overcome. This paper presents the current scenario of sensor networks and some of their obstacles. Thus, the proposal to use the propagation of mechanical waves on the walls of metal pipes is presented as a means of communication for sensor networks at short distances. The proposed methodology provides for the use of a notebook with MATLAB software to modulate and demodulate the transmitted data and the use of piezoelectric sensors to capture the mechanical waves propagated in the pipe.

Keywords: IoT. Telecommunications. Sensors. Vibrations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de pesquisa científica	15
Figura 2 – Modulação ASK - OOK	18
Figura 3 – Modulação FSK.....	18
Figura 4 – Modulação ASK - PRK.....	19
Figura 5 – Propagação de uma onda (a) longitudinal; (b) transversal.	21
Figura 6 – Arquitetura da planta.....	22
Figura 7 – Fixação do tubo de inox à base de madeira.....	23
Figura 8 – Detalhe da fixação do tubo com abraçadeira e borracha.....	23
Figura 9 – Detalhes de Fixação das Peças L.....	24
Figura 10 – Diagrama de Blocos da Planta	24
Figura 11 – Sinal de Mensagem	25
Figura 12 – Sinal Transmitido	25
Figura 13 – Sinal Elétrico de 1 pulso.....	26
Figura 14 – Sinal Elétrico Recebido	26
Figura 15 – Sinal Recebido com $F_s = 4F_{s0}$	27
Figura 16 – Sinal de Mensagem Recebido	27
Figura 17 – Sinal Elétrico com $R = 10$ amostras por segundo	30
Figura 18 – Sinal Elétrico com $R = 16$ amostras por segundo	30
Figura 19 – Sinal de Informação Original e Sinal de Informação Recebido.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – SER vs Taxa de Transmissão	29
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Analógico-Digital
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
bps	<i>bit per second</i>
CC	Corrente Contínua
DA	Digital-Analógico
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
PRK	<i>Phase Reversal Keying</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
SER	<i>Symbol Error Rate</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Apresentação	11
1.2	Objeto e Escopo deste Trabalho	12
1.2.1	Objeto	12
1.2.2	Escopo	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo Geral	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	Classificação da Pesquisa	14
1.6	Estrutura do Texto	15
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	17
2.1	Princípios de Comunicação	17
2.1.1	Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK)	17
2.1.2	Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK)	18
2.1.3	Modulação por Chaveamento de Fase (PSK)	18
2.1.4	Conversão entre Sinais Analógicos e Digitais	19
2.2	Propagação de Ondas Mecânicas	20
2.3	Transdutores de Som	21
3	SISTEMA PROPOSTO	22
3.1	Arquitetura Implementada	22
3.2	Metodologia dos Experimentos	24
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	28
4.1	Equipamentos Utilizados	28
4.2	Resultados	28
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A humanidade sempre buscou desenvolver novas técnicas para aumentar a qualidade de vida e a produtividade de alimentos e outros bens de consumo. Para alcançar esses objetivos, diversas inovações tecnológicas ocorreram, modificando profundamente a indústria e o desenvolvimento da sociedade, que assiste às transformações tecnológicas sem precedentes com a ascensão da Indústria 4.0 (SAKURAI; ZUCHI, 2018).

Nesse sentido, diversos avanços tecnológicos ocorreram na área de microprocessadores, levando ao surgimento de novos equipamentos para sensoriamento, microsistemas eletromecânicos e comunicações sem fio. Como consequência, estimulou-se o uso de sensores inteligentes em áreas ligadas a processos físicos, químicos, biológicos e outros (SANTOS, 2007).

Tradicionalmente, os sistemas de sensoriamento industrial operavam isolados ou comunicando-se com uma central de monitoramento por meio de redes cabeadas. Neste último caso, o procedimento de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que os próprios sensores (LU; GUNGOR, 2009). Além disso, em algumas aplicações, o ambiente é hostil, prejudicando a transferência de dados e a integridade física dos cabos de transmissão de dados.

Gomes e outros (2014) sugerem que uma opção para configuração de sistemas de monitoramento industrial de custo reduzido se dá por meio de redes sem fio, que têm vantagens como maior flexibilidade, baixo custo de instalação e manutenção relativamente simples. Os nós que compõem as Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são equipados com sensores ou atuadores, capacidade de comunicação via radiofrequência e podem ainda ser capazes de processar dados.

Segundo os mesmos autores, sistemas de automação industrial que utilizam RSSF apresentam diversos desafios a serem superados, pois utilizam um meio de comunicação não confiável, devido a ruídos e interferências no espectro de radiofrequência causados por equipamentos

como máquinas de solda, fornos micro-ondas e outros dispositivos que produzem campos eletromagnéticos, como roteadores *Wi-Fi* e redes *Bluetooth*. Ademais, ambientes industriais são populados por muitas máquinas e estruturas metálicas que oferecem barreiras à propagação de ondas eletromagnéticas devido ao **efeito pelicular**, que é um fenômeno que causa o decaimento exponencial da amplitude de uma onda eletromagnética quando esta atravessa um meio metálico, induzindo correntes elétricas que culminam em perdas ôhmicas e aquecimento do material (SCHMITZ, 2013).

Um importantíssimo contexto a ser considerado é o das aplicações em plataformas de produção de petróleo e gás, onde a própria infraestrutura é composta por estruturas de metal que atuam como barreiras ao emprego de tecnologias de comunicação por radiofrequência. Nesse contexto, não só os sistemas de comunicação são prejudicados, mas as correntes e o aquecimento causados pelo efeito pelicular podem oferecer riscos à segurança quando ocorrer em **área classificada**, definidas pela ABNT NBR IEC 60079-0:2020 como área na qual pode ser prevista uma atmosfera explosiva, sendo necessários cuidados especiais para construção, instalação e utilização de equipamentos.

Em vista dos riscos e desafios apresentados para estabelecer comunicação em ambiente industrial com baixo custo de instalação e manutenção, de modo a garantir confiabilidade do envio e recebimento de informações, percebe-se a necessidade de investir na produção de novas tecnologias de comunicação nesses ambientes, principalmente para o desenvolvimento de redes de comunicação com limitações de energia e pequena largura de banda (SANTOS, 2007).

1.2 Objeto e Escopo deste Trabalho

1.2.1 Objeto

O objeto do presente trabalho é a construção de um protótipo para transmissão de informações por meio de vibrações em uma tubulação metálica, visando implementar uma tecnologia de comunicação voltada para áreas classificadas, usando técnicas de modulação e demodulação analógica e digital.

1.2.2 Escopo

Delimita-se o escopo deste trabalho de pesquisa a transmissão de informações, bem como a análise de resultados usando Modulação por Chaveamento de Amplitude (do inglês *Amplitude Shift Keying*, ASK). Além disso, pretende-se verificar possíveis faixas de frequência para transmissão e recepção do sinal.

1.3 Justificativa

Como uma tecnologia em ascensão, a Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things*, IoT) tem ganhado interesse por parte de pesquisadores e indústrias, o que leva a um aumento no número de sensores alimentados por baterias conectados às redes. Por isso, é preciso investir em tecnologias de transmissão de dados de baixa largura de banda. Vários padrões têm sido propostos para suprir essas necessidades, como, por exemplo, *LoRa* e *SigFox*, têm se popularizado como boas soluções para comunicação em longo alcance (REYNDERS; MEERT; POLLIN, 2016).

Ondas de radiofrequência interagem com dispositivos eletrônicos e se propagam através de paredes causando atenuação em sua propagação. Essas interferências limitam as taxas de transmissão de dados (JHA; MISHRA; KUMAR, 2017). Além disso, como a maioria das aplicações industriais apresentam barreiras metálicas, o emprego de técnicas de transmissão de dados sem fio utilizando radiofrequência apresenta forte atenuação devido ao efeito pelicular, que gera aquecimento nas partes metálicas, resultando também em riscos de incêndio nas aplicações em áreas classificadas (SCHMITZ, 2013).

Visando contornar os custos e problemas recorrentes em tecnologias cabeada e por radiofrequência, uma possível solução é a comunicação usando as paredes metálicas de tubulações para transmitir dados, em curtas distâncias, utilizando ondas mecânicas (ondas sonoras).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho consiste em analisar a viabilidade de transmissão de dados de sensores por meio da codificação de vibrações em tubulações metálicas de plataformas de petróleo.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos deverão ser atendidos:

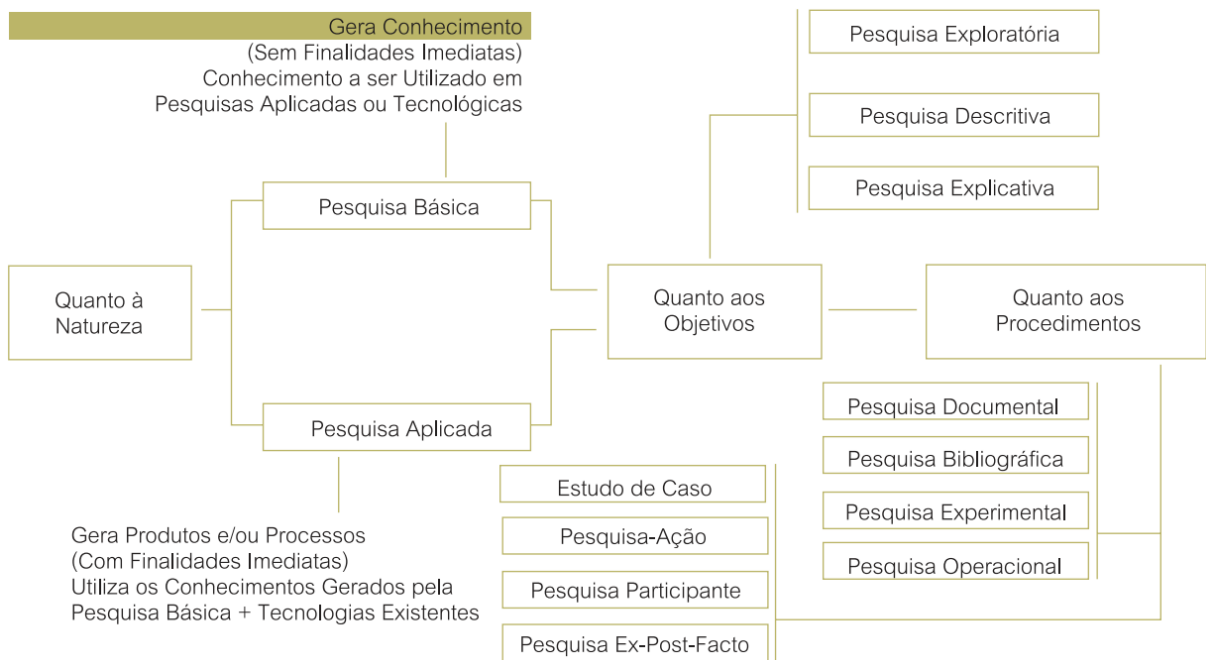
- a) verificação da faixa de frequência para transmissão;
- b) averiguação da máxima taxa de transmissão possível;

1.5 Classificação da Pesquisa

O objetivo de uma pesquisa científica é adquirir conhecimentos sobre um determinado assunto, podendo assim, colaborar para a evolução do conhecimento humano. O planejamento de uma pesquisa depende de vários fatores, tais como o problema estudado, natureza do tema, nível de conhecimento do pesquisador, etc. Logo, é necessário classificar cada tipo de pesquisa de acordo com suas particularidades (PRODANOV, 2013).

A Figura 1 apresenta as formas clássicas de classificação de pesquisas científicas. Do ponto de vista de sua natureza, o atual projeto classifica-se como uma **pesquisa aplicada**, pois seu objetivo final é gerar conhecimentos para resolver problemas de transmissão de dados de sensores de tubulações metálicas. Quanto aos objetivos, classifica-se como uma **pesquisa explicativa**, onde há necessidade de aprofundamento da realidade, baseando-se em métodos experimentais que envolvem identificação, manipulação e controle de variáveis independentes do sistema e suas consequências.

Figura 1 – Tipos de pesquisa científica



Fonte: Adaptado de Silva (2004), citado por Prodanov (2013).

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos adotados, este trabalho possui caráter **experimental**, pois definiu-se muito bem o objeto de estudo como sendo a transmissão de informações por meio de vibrações e escolheu-se variáveis como o tipo de modulação e a frequência de transmissão, por exemplo, para análise dos efeitos que essas variáveis produzem no objetivo.

1.6 Estrutura do Texto

O presente trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

- a) **Introdução:** o objetivo da primeira seção é contextualizar a problemática abordada neste trabalho, apresentando o problema, suas aplicações no cotidiano e as ideias iniciais de solução. Em adição, são expostos os objetivos gerais e específicos para a realização deste projeto de graduação.
- b) **Embasamento Teórico:** nesta seção são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento do modelo proposto, tais como: ondas mecânicas, modulação de sinais, sinais de informações analógicos e digitais, dentre outros.
- c) **Sistema Proposto:** são descritos os métodos e as etapas de desenvolvimento executadas para solucionar o problema abordado.

- d) **Experimentos e Resultados:** são exibidos os resultados obtidos com a metodologia aplicada.
- e) **Conclusão:** nesta seção final, são indicadas as conclusões relativas aos resultados obtidos, além de apresentar propostas para estudos e trabalhos futuros.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

O processo de comunicação é constituído pela transferência de **informação** entre uma **fonte** e um **destino**. Quando estes dois elementos estão distantes, há a necessidade de um sistema de telecomunicação para que a informação gerada seja transmitida ao destinatário por meio de uma mensagem (CARVALHO, 2008). Nesta pesquisa, são abordados alguns conceitos e fenômenos necessários para a melhor compreensão do sistema de comunicação proposto.

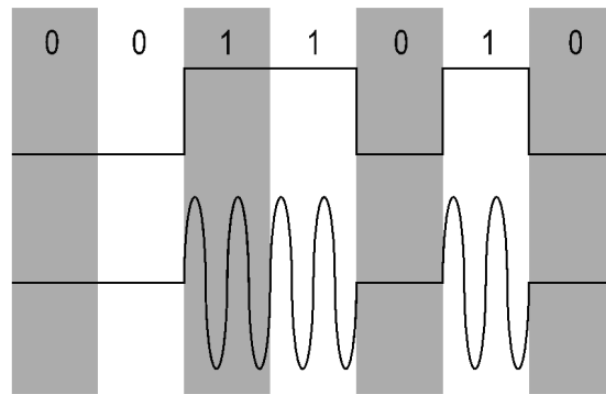
2.1 Princípios de Comunicação

Em sistemas computacionais, é necessário que o sinal de informação fornecido seja modificado por ondas portadoras, cujas características sejam compatíveis para os meios de transmissão (NEUMANN *et al.*, 2021). Para facilitar a interpretação dos dados pelo receptor, as informações a serem transmitidas devem passar por um processo de tratamento de sinais, denominado **modulação**. O processo de modulação digital com portadora consiste em variar um dos parâmetros de uma onda portadora, de forma sistemática, de acordo com o sinal de dados que se deseja transmitir. Os parâmetros da portadora que podem ser variados são sua amplitude, sua frequência e seu ângulo de fase (CARVALHO, 2008; SCHMITZ, 2013).

2.1.1 Modulação por Chaveamento de Amplitude (ASK)

A modulação ASK (do inglês *Amplitude Shift Keying* – Chaveamento de Amplitude) é a mais simples técnica de modulação digital, onde símbolos são representados como várias amplitudes discretas em uma portadora com frequência constante (LI; HUTCHINS; GREEN, 2008). O caso mais básico de modulação digital ASK é o **Chaveamento Liga-Desliga (do inglês *On-Off Keying*, OOK)**, onde a portadora é transmitida para níveis lógicos altos e suprimida para níveis lógicos baixos, daí a denominação OOK (CARVALHO, 2008). Um exemplo de forma de onda desse tipo de modulação é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Modulação ASK - OOK

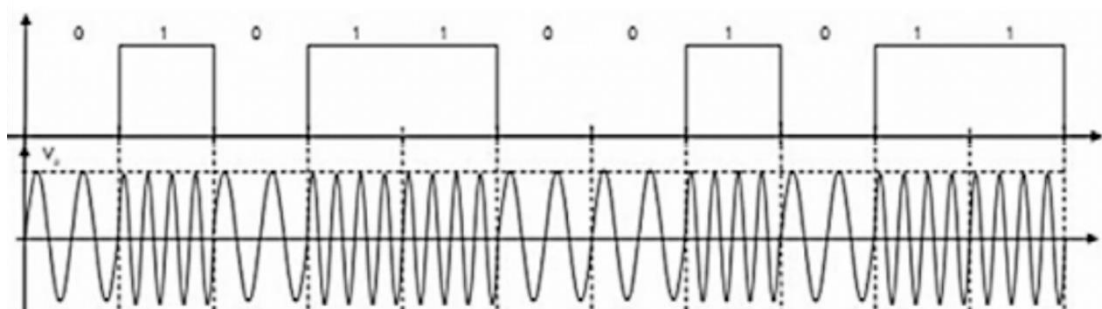


Fonte: Schmitz (2013).

2.1.2 Modulação por Chaveamento de Frequência (FSK)

A técnica FSK (do inglês *Frequency Shift Keying*) consiste na mudança da frequência da portadora de acordo com o sinal digital a ser transmitido, enquanto a amplitude se mantém inalterada. Para esse tipo de transmissão, é necessária uma maior largura de banda, mas o sistema se torna mais resistente à influência de ruídos (NEUMANN *et al.*, 2021). Um exemplo de forma de onda desse tipo de modulação pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Modulação FSK

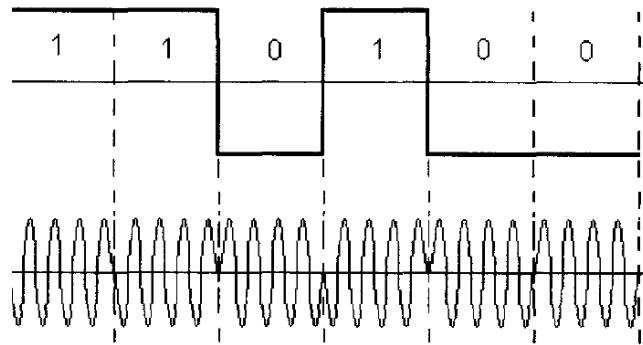


Fonte: Adaptado de Neumann (2021).

2.1.3 Modulação por Chaveamento de Fase (PSK)

A técnica de modulação PSK (do inglês *Phase Shift Keying*) sustenta a frequência e amplitude da portadora enquanto varia-se a fase da portadora. Por exemplo, o **Chaveamento por Reversão de Fase (do inglês *Phase Reversal Keying, PRK*)**: a fase da portadora comuta entre 0 rad, para nível lógico alto, e π rad, para nível lógico baixo. A Figura 4 ilustra o formato típico desse tipo de modulação.

Figura 4 – Modulação ASK - PRK



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

2.1.4 Conversão entre Sinais Analógicos e Digitais

Um sinal é **analógico** se seu valor pode ser variado continuamente com resolução infinita em tempo e magnitude. Grandezas físicas se encontram na natureza de forma analógica. Já um sinal **digital** é aquele que tem um número finito de possibilidades predeterminadas (SILVEIRA, 2016).

Pode-se transmitir qualquer tipo de informação representada por um sinal analógico ou digital. Além disso, é possível realizar a conversão de sinais analógicos para digitais e vice-versa. Por exemplo, pode-se digitalizar um sinal de voz analógico e transmiti-lo digitalmente. Há basicamente três passos para a digitalização de um sinal analógico: amostragem, quantização e codificação. O primeiro passo consiste em obter amostras de amplitude do sinal em instantes de tempo discretos, chamado **período de amostragem** (T_a). Em seguida é preciso fazer a quantização, que é a aproximação dos valores obtidos, para um conjunto finito de níveis. Este passo define a resolução do sinal amostrado. Finalmente, na codificação, cada nível quantizado é designado por um dado código (FERNANDES; PANAZIO, 2009).

De acordo com o **Teorema da Amostragem de Nyquist**, para que se possa reconstruir um sinal qualquer, a taxa de amostragem do sinal deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima do sinal amostrado, logo, o período de amostragem deve ser no máximo metade do período do sinal amostrado (GIROD; RABENSTEIN; STENGER, 2003, *apud* NEUMANN *et al.*, 2021).

A conversão analógica para digital é motivada por certas vantagens que a representação digital possui em aplicações eletrônicas. Por exemplo, o processamento e transmissão de dados digitais é mais eficiente e confiável que dados analógicos (FLOYD, 2009).

2.2 Propagação de Ondas Mecânicas

As ondas são um dos principais campos de estudo da física. Um bom exemplo da importância das ondas no mundo contemporâneo é a indústria musical. O simples ato de ouvir uma música envolve a produção de ondas pelos artistas, sua transmissão pelo meio (o ar, no caso de uma apresentação ao vivo) e a detecção dessas ondas pela plateia (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Pela definição de Halliday e outros (2012, apud PIUBELLI *et al.*, 2013, p. 1501-2), considera-se uma onda a transmissão de um sinal, entre dois pontos, com uma certa velocidade, transportando energia e momento sem haver movimento direto de matéria. Se não for necessário um meio material para a propagação do sinal, como no caso da luz, então ela é chamada de onda eletromagnética. Por outro lado, se for necessário um meio material para que ela se propague, esta é classificada como uma onda mecânica.

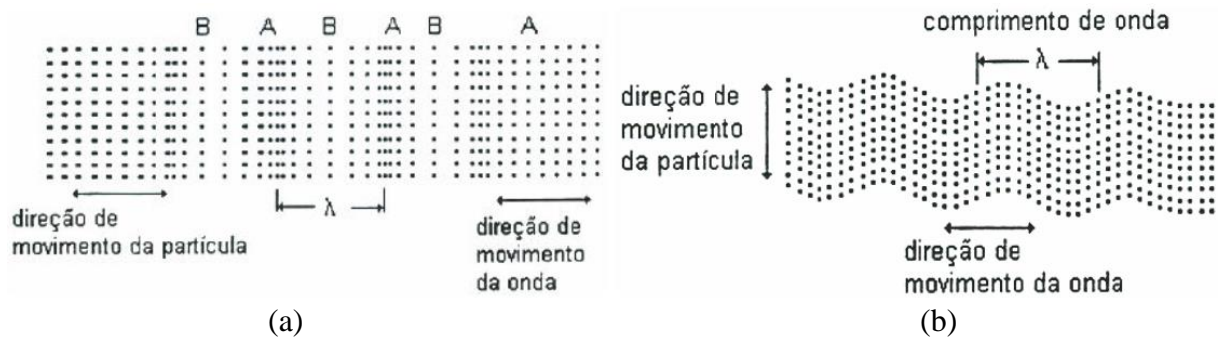
São exemplos de ondas mecânicas: as sonoras, ondas sísmicas e ondas se propagando em uma corda. Duas características interessantes são que as dinâmicas dessas propagações são governadas pelas leis de Newton (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012) e não há arrastamento do meio junto com o transporte da perturbação (PIUBELLI *et al.*, 2013).

A propagação de ondas mecânicas se dá por meio de deslocamentos das partículas atômicas ou moléculas do meio através do qual a onda se propaga, mas, em média, os átomos permanecem em suas posições de equilíbrio. O deslocamento define se a onda propagada é longitudinal ou transversal (FERREIRA *et al.*, 2010).

Piubelli e outros (2013) explicam que uma onda é classificada como **onda longitudinal**, Figura 5 (a), quando a direção de deslocamento das partículas é igual à direção de propagação da perturbação, como as ondas sonoras. E é classificada como **onda transversal**, Figura 5 (b),

quando a direção de deslocamento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda, como um pulso se propagando ao longo de uma corda.

Figura 5 – Propagação de uma onda (a) longitudinal; (b) transversal.



Fonte: Ferreira e outros (2010).

2.3 Transdutores de Som

De acordo com Shung e Zipparo (1996, apud ANDRADE, 2006, p. 1), um transdutor de som é um dispositivo capaz de converter um sinal elétrico em onda acústica e inversamente, uma onda acústica em um sinal elétrico. Isso é possível graças ao efeito piezoelétrico.

Certos materiais apresentam a propriedade de sofrerem uma deformação mecânica, numa certa direção, quando é aplicada uma diferença de potencial nos eletrodos de sua superfície.

Este é o chamado **efeito piezoelétrico inverso**. A recíproca também é válida, isto é, quando aplicada uma força mecânica suficiente para deformar a superfície do material, surge uma diferença de potencial em seus eletrodos. Esse é o **efeito piezoelétrico direto** (FARIA, 2006).

Beneficiando-se dessas propriedades, é possível utilizar materiais piezoelétricos para produção de microfones, captadores para instrumentos musicais, transdutores ultrassônicos, acelerômetros, sonares, etc. (ANDRADE, 2006; FARIA, 2006).

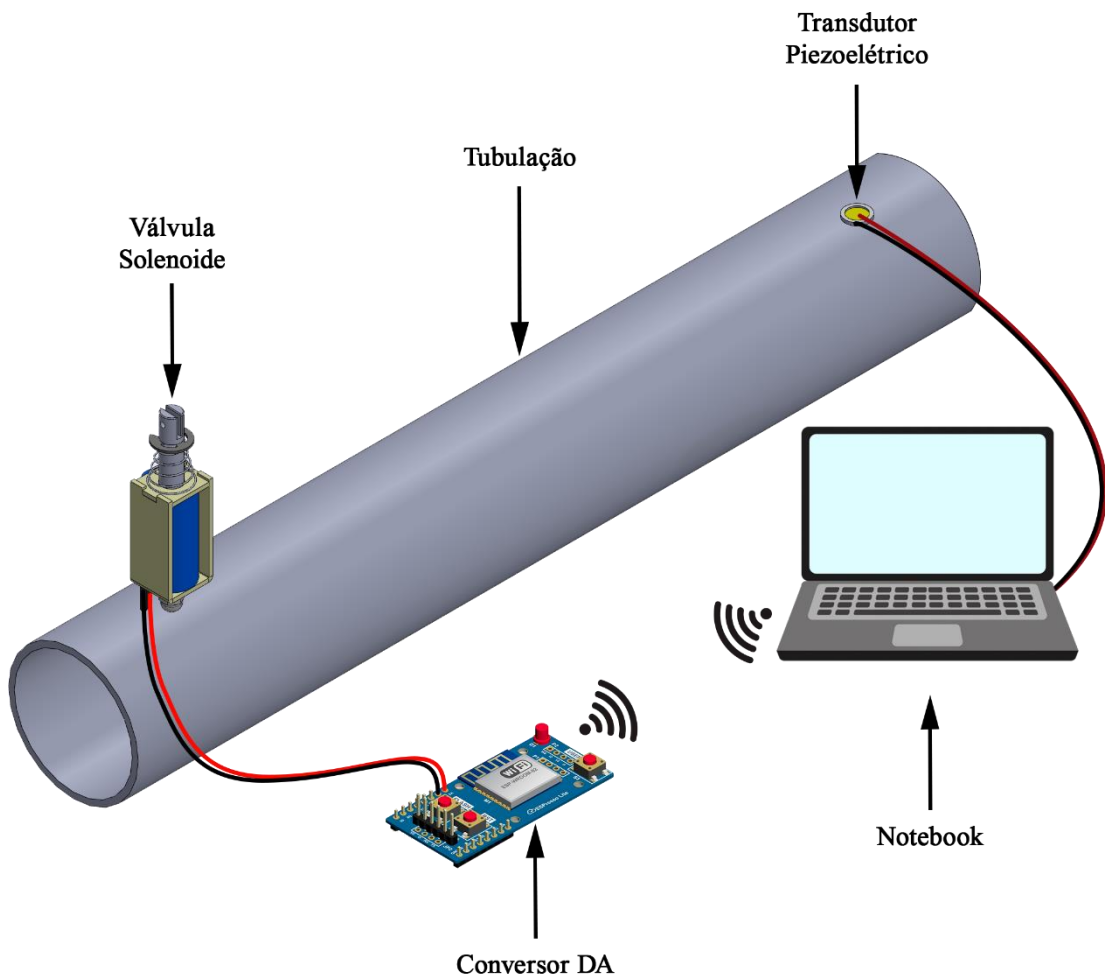
3 SISTEMA PROPOSTO

3.1 Arquitetura Implementada

Inicialmente, construiu-se uma bancada que servisse de base para os elementos que compõe a planta apresentada na Figura 6.

O tubo foi afixado com duas abraçadeiras de metal em uma base de madeira aglomerada, para que a bancada ficasse estável (Figura 7). Entre as abraçadeiras e o tubo, adicionou-se tiras de borracha macia, para amortecer as vibrações (conforme indicado na Figura 8). Desse modo, reduz-se o efeito de reflexão da onda quando esta atinge as extremidades do tubo.

Figura 6 – Arquitetura da planta



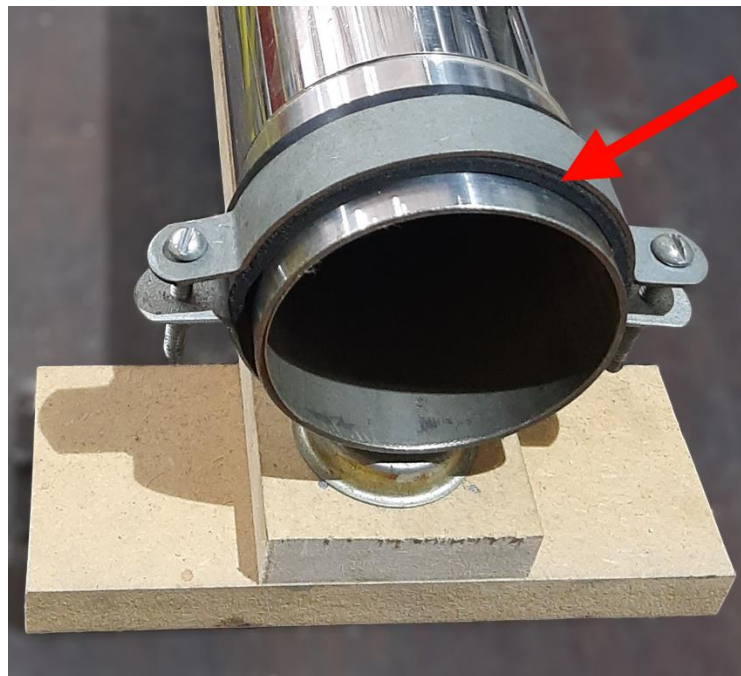
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 7 – Fixação do tubo de inox à base de madeira



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 8 – Detalhe da fixação do tubo com abraçadeira e borracha

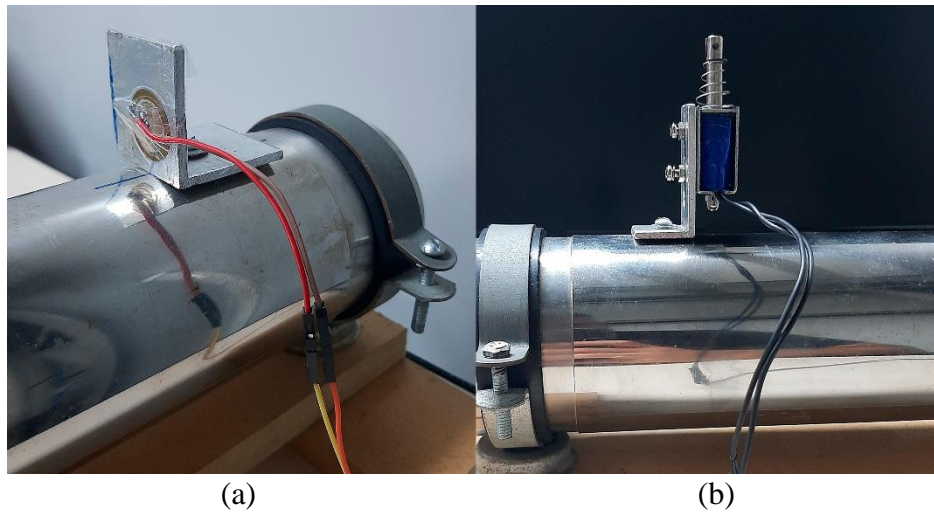


Fonte: Produção do próprio autor.

Parafusou-se duas pequenas chapas de alumínio dobradas em “L” próximas às extremidades do tubo. As chapas foram utilizadas para a fixação do transdutor piezoelétrico (Figura 9 (a)) e da válvula solenoide (Figura 9 (b)).

Nesta arquitetura, o controle de todos os processos experimentais foi realizado pelo *notebook*, por meio do *software* MATLAB, que efetuou o processamento de todos os dados, desde a geração do sinal de mensagem, modulação do sinal transmitido, recepção do sinal do sensor piezoelétrico e demodulação do sinal de mensagem.

Figura 9 – Detalhes de Fixação das Peças L

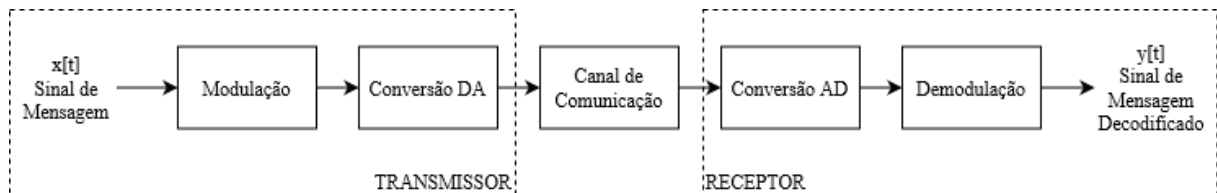


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Metodologia dos Experimentos

O diagrama de blocos da Figura 10 apresenta o fluxo de dados no sistema implementado.

Figura 10 – Diagrama de Blocos da Planta



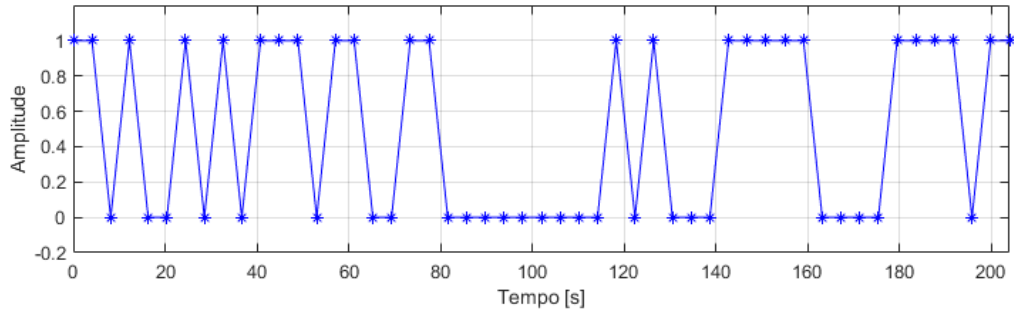
Fonte: Produção do próprio autor.

Desenvolveu-se um programa no MATLAB para que fosse gerada uma sequência aleatória de *bits*, chamada de **sinal de mensagem** ($x[t]$), como apresentado na Figura 11. Para garantir maior robustez e confiabilidade para a transmissão, este sinal foi amostrado (*upsampling*) com uma taxa quatro vezes maior que a taxa de amostragem original (F_{s0}), formando assim uma nova sequência de *bits*, chamada de **sinal transmitido** ($x_{up}[t]$), Figura 12. Desse modo, o sinal de mensagem e o sinal transmitido têm a mesma duração, mas diferentes números de amostras.

O sinal transmitido, foi enviado do *notebook* ao **conversor digital-analógico** (DA) via Wi-Fi pelo protocolo MQTT (OASIS MQTT TECHNICAL COMMITTEE, 2022), onde converteu-se a sequência de *bits* para um sinal analógico, utilizando a modulação OOK: para transmitir o

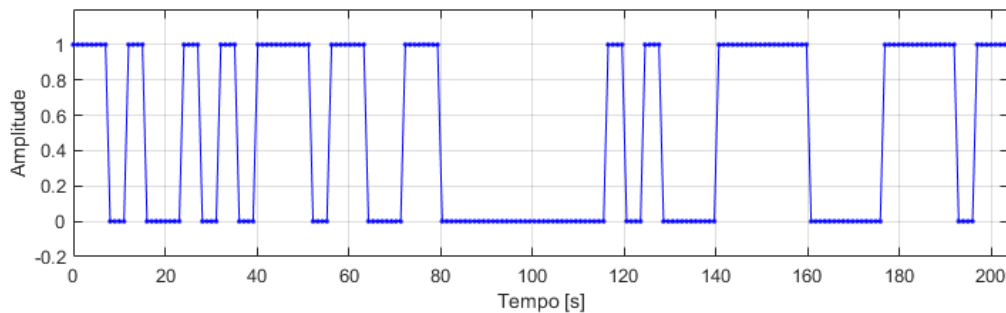
nível lógico alto (*bit* 1), aplicou-se um pulso de tensão com largura de meio tempo de *bit* ao solenoide no início do tempo do *bit* e para transmitir o nível lógico baixo (*bit* 0), não foi aplicado o pulso de tensão durante um tempo de *bit*.

Figura 11 – Sinal de Mensagem



Fonte: Produção do próprio autor.

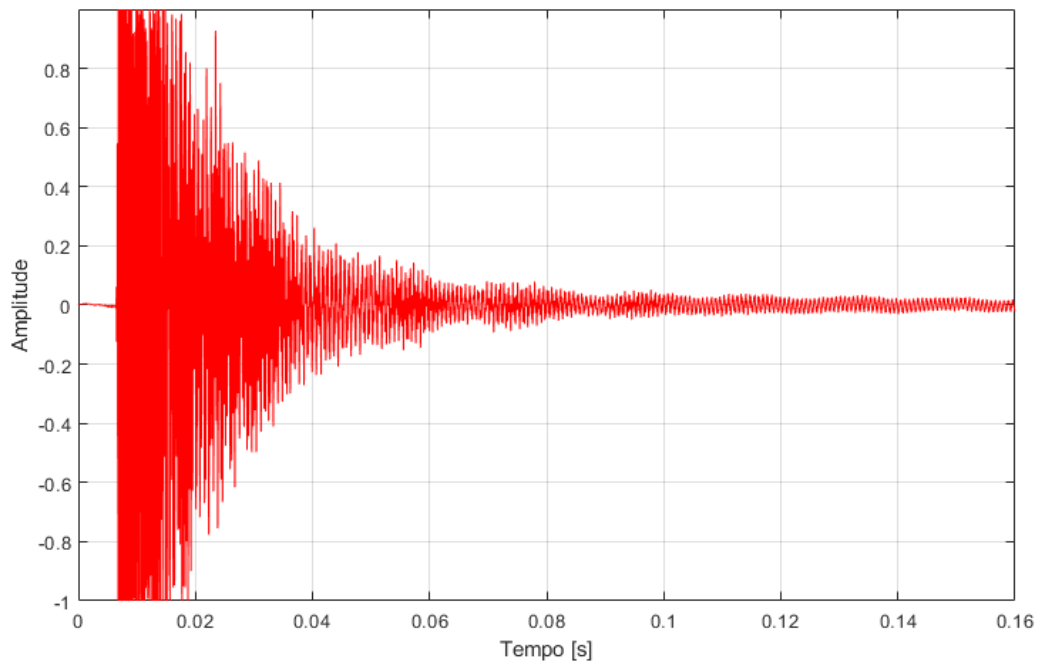
Figura 12 – Sinal Transmitido



Fonte: Produção do próprio autor.

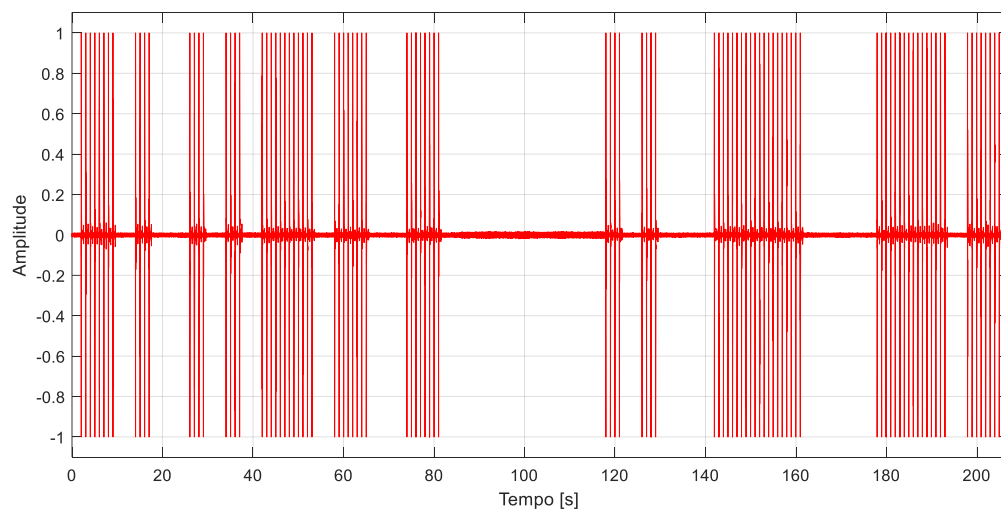
Quando um pulso de tensão é aplicado ao solenoide (afixado próximo a uma extremidade do tubo de inox, Figura 9 (b)), o mesmo é ativado e o impacto de seu pistão com o tubo gera uma onda acústica que se propaga pelo **canal de comunicação** (o tubo de inox). O transdutor piezoelétrico (afixado próximo à outra extremidade do tubo, Figura 9 (a)) capta a onda acústica e a converte em um sinal elétrico que é recebido pelo *notebook* através da entrada de áudio do dispositivo. O sinal elétrico contínuo é convertido para um sinal elétrico digital (Figura 13) a uma taxa de amostragem mínima de 44100 amostras por segundo e quantizado com uma resolução de 16 *bits*, ou seja, até 2^{16} diferentes níveis de amplitude variando de -1 a 1. Assim, quando o sinal da Figura 12 foi transmitido, obteve-se após a conversão analógico-digital (AD), um sinal elétrico como o da Figura 14.

Figura 13 – Sinal Elétrico de 1 pulso



Fonte: Produção do próprio autor.

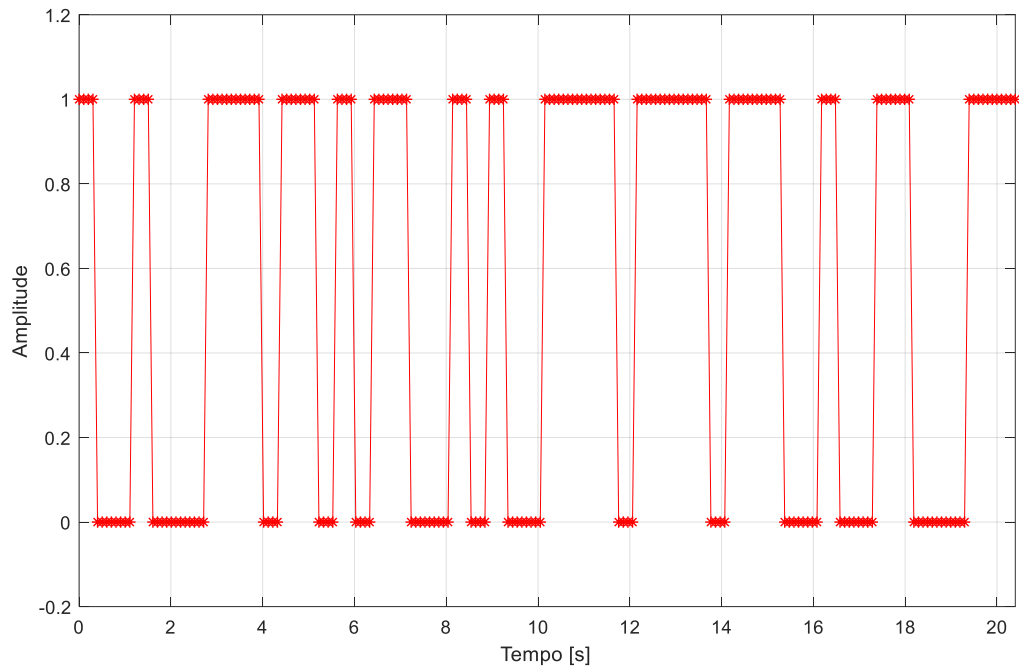
Figura 14 – Sinal Elétrico Recebido



Fonte: Produção do próprio autor.

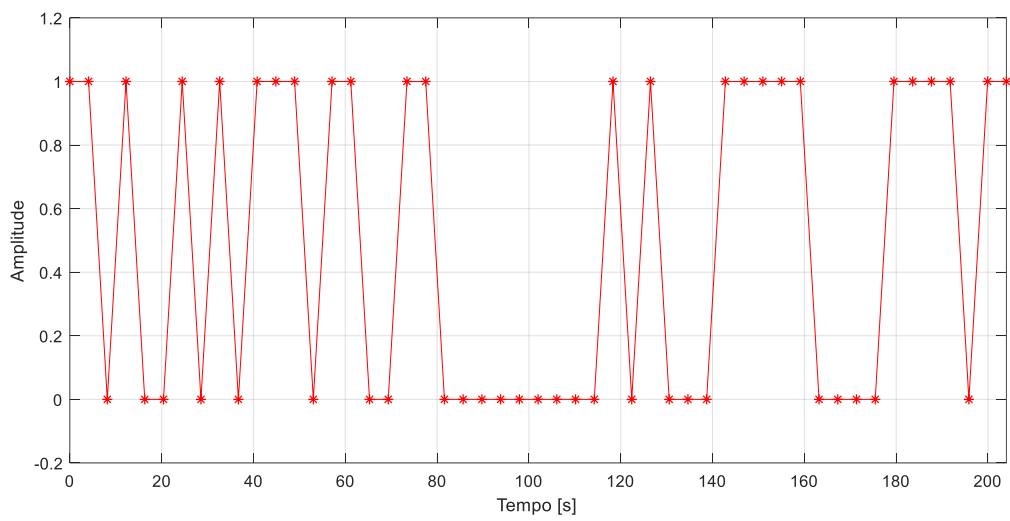
A essa sequência de pulsos (Figura 14) foi aplicada a **decodificação** da modulação OOK e a reamostragem para a taxa de amostragem de $4F_{s0}$, formando o sinal recebido ($y_{up}[t]$) ilustrado na Figura 15. Em seguida, é realizada uma nova amostragem (*downsampling*) para a taxa de F_{s0} . Esta última sequência representa o sinal de mensagem recuperado ($y[t]$), exibido na Figura 16.

Figura 15 – Sinal Recebido com $F_s = 4F_{s0}$



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 16 – Sinal de Mensagem Recebido



Fonte: Produção do próprio autor.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A fim de avaliar a eficiência da transmissão de dados na planta implementada, realizou-se o seguinte experimento: variou-se a taxa de transferência de *bits* (*R*) de 1 a 21 *bits* por segundo (bps). Com isso, variou-se o tempo de *bit* 1,0 s até 0,0476 s. Para cada taxa de transmissão, foram enviados três sinais de mensagem aleatórios de 51 *bits* de comprimento, como realizou-se o *upsampling* com um fator quatro, cada sinal transmitido tinha comprimento de 204 *bits*. Assim, foram transmitidos 612 *bits* para cada taxa de transferência. Na modulação OOK implementada, cada símbolo é constituído por 1 *bit*, logo, o número de símbolos transmitidos é igual ao número de *bits* transmitidos. Calculou-se a taxa de erro de símbolo (do inglês *Symbol Error Rate*, SER), de acordo com a equação (1):

$$SER = \frac{n^{\circ} \text{ de erros de símbolo}}{n^{\circ} \text{ de símbolos transmitidos}} \times 100\% \quad (1)$$

4.1 Equipamentos Utilizados

Para a implementação do sistema proposto utilizou-se dos seguintes equipamentos:

- Válvula solenoide modelo JF-0530B;
- *Notebook*;
- Sensor piezoelétrico;
- Tubo de inox;
- Osciloscópio *Tektronix* TBS 1052B-EDU;
- Módulo Wi-Fi ESP8266;
- Ponte H L298N;
- Fonte de bancada com tensão variável.

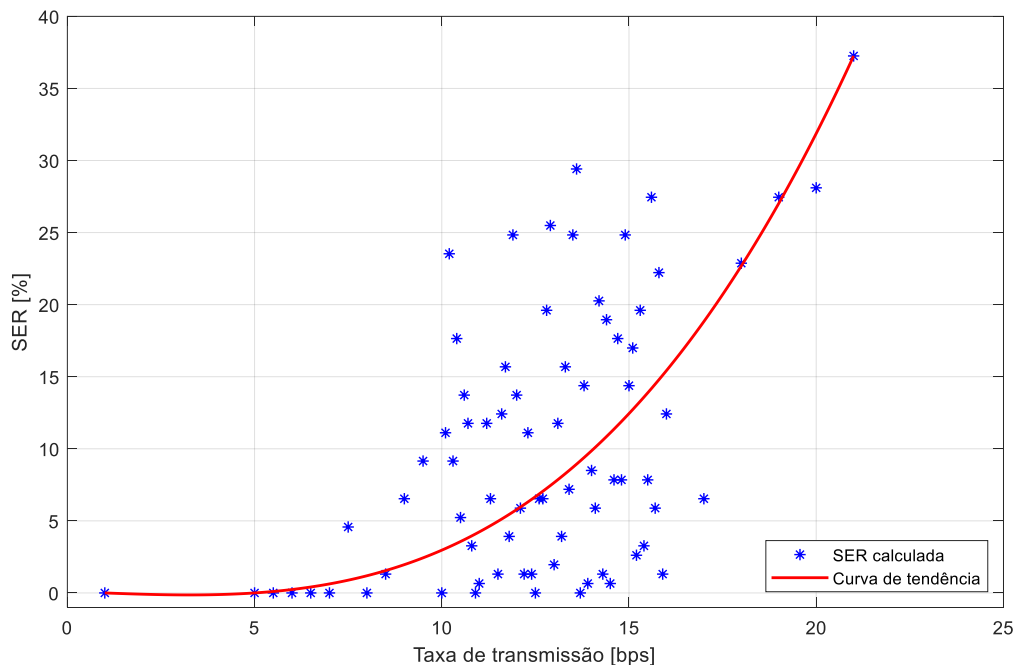
4.2 Resultados

Os resultados alcançados com o experimento descrito são apresentados no Gráfico 1 – SER vs Taxa de Transmissão. Percebeu-se que houve uma variação muito grande da SER, principalmente para taxas de transferência acima de 10 bps, de maneira que não foi possível tirar conclusões precisas a respeito do desempenho do sistema apenas com a SER calculada.

Por isso, traçou-se uma linha de tendência com o auxílio da ferramenta *cftool* do MATLAB (MATHWORKS, INC., 2022).

Pela análise da curva de tendência, percebeu-se que com o aumento da taxa de transferência a qualidade da transmissão diminuiu bastante. Com taxas de transferência acima de 15,8 bps, a SER foi maior que 15 %, tornando muito difícil a transmissão de dados. Já para $R < 10$ bps, obteve-se $SER < 3$ %, dessa forma, foi possível transmitir sinais de mensagens pequenos sem grandes perdas.

Gráfico 1 – SER vs Taxa de Transmissão



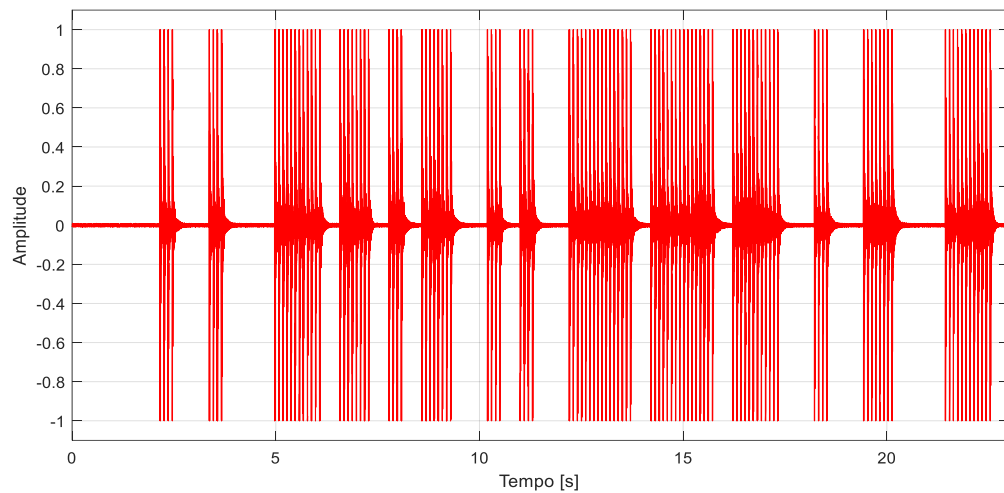
Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal elétrico recebido foi amostrado com uma taxa mínima $F_{SE} = 44100$ amostras por segundo. Como a maior taxa de amostragem utilizada para o sinal transmitido foi $F_{SX} = 21$ amostras por segundo, cumpriu-se o requisito do Teorema da Amostragem (CARVALHO, 2008), pois $F_{SE} \gg 2F_{SX}$. Desse modo, descartou-se a possibilidade de haver erros causados pela digitalização do sinal transmitido.

Durante a realização do experimento, percebeu-se que o pistão da válvula solenoide passou a sofrer com atrito e aquecimento, principalmente para $R > 10$ amostras por segundo, causando a diminuição na força do impacto entre o pistão e o tubo, o que implicou na redução da

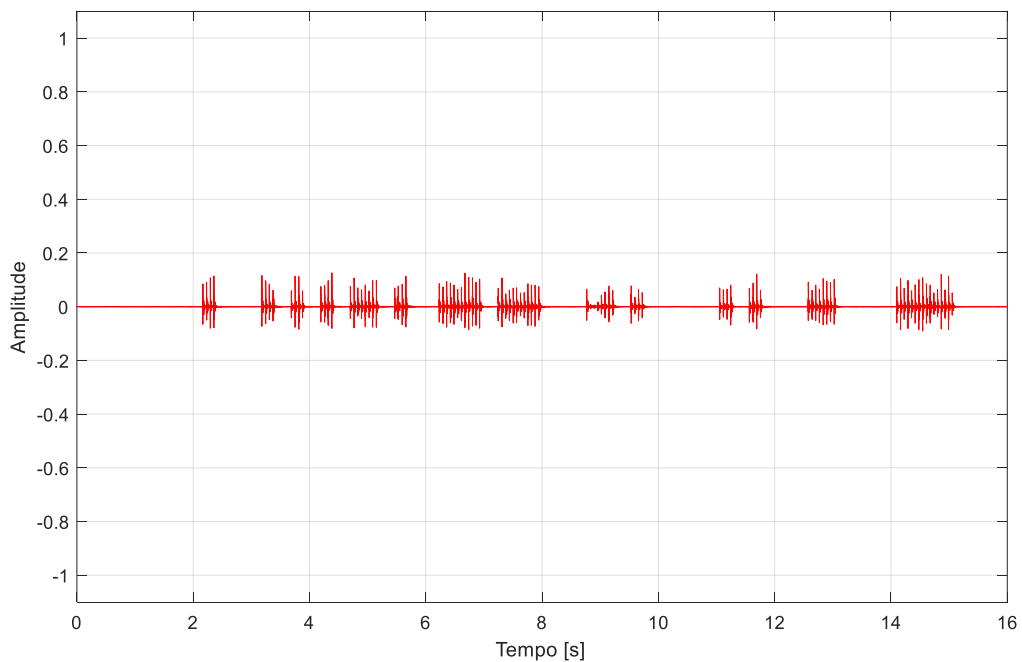
amplitude da onda acústica e, conseqüentemente, do sinal elétrico recebido. Comparando-se, por exemplo, os sinais elétricos recebidos nas transmissões com $R = 10$ bps (Figura 17) e com $R = 16$ bps (Figura 18), percebeu-se que houve uma grande diferença na amplitude do sinal elétrico recebido. Este fenômeno prejudicou a recuperação da informação representada pelo sinal de mensagem. Na figura pode-se observar os erros de *bit* entre o sinal de informação original e o recebido.

Figura 17 – Sinal Elétrico com $R = 10$ amostras por segundo



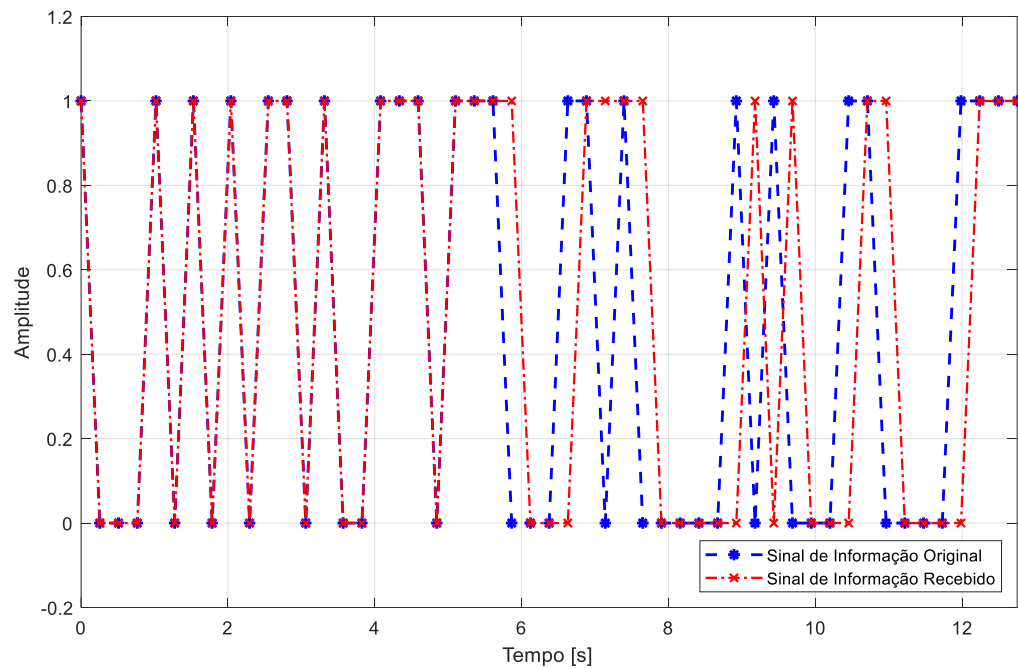
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 18 – Sinal Elétrico com $R = 16$ amostras por segundo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Sinal de Informação Original e Sinal de Informação Recebido



Fonte: Produção do próprio autor.

As variáveis da planta, como a distância entre o transmissor (válvula solenoide) e receptor (sensor piezoelétrico) e o canal de comunicação (tubo de inox) não foram modificados, logo, constatou-se que a queda de amplitude com o aumento da taxa de amostragem está associada às limitações mecânicas do transmissor. Ou seja, a frequência de operação foi limitada pelas características físicas do mesmo, como o tempo de atuação mecânica a partir do instante que foram aplicados pulsos de tensão em seus terminais.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desse trabalho foi analisar a viabilidade de transmissão de dados de sensores por meio da codificação de vibrações em tubulações metálicas de plataformas de petróleo. Para isso, construiu-se uma bancada experimental que possibilitou a realização dos testes descritos. O sistema foi testado e avaliado utilizando-se como métrica de qualidade a taxa de transferência e a taxa de erro de símbolo.

Em suma, concluiu-se que foi possível transmitir dados com taxas de 1 a 10 bps, pois obteve-se $SER < 3\%$. Acima de 10 bps não foi possível transmitir informações de maneira satisfatória. Este resultado demonstra que há potencial para transmissão de dados com baixa largura de banda por vibrações codificadas em tubulações metálicas.

Para trabalhos futuros é interessante mencionar que se pode alcançar um significativo aumento do desempenho do sistema, optando-se por um transmissor com as seguintes características: controle de amostragem e frequência de operação simples e robusto; tempo de atuação mecânica menor que o utilizado na planta implementada neste trabalho; maior resistência às variações de temperatura do ambiente de operação. Uma sugestão seria substituir a válvula solenoide por um pequeno motor de corrente contínua (CC) com eixo desbalanceado, isto é, um motor *vibracall*. Outra ideia, seria substituir o solenoide por um dispositivo transdutor de som ou ultrassom baseado em material piezoelétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Marco Aurélio Brizzotti. **Análise de materiais piezoelétricos compósitos para aplicações em transdutores de ultra-som**. 2006. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60079-0: Atmosferas explosivas. Parte 0: Equipamentos – Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

CARVALHO, Rogerio Muniz. **Comunicações Analógicas e Digitais**. Vitória: Editado pelo Autor, 2008.

FARIA, Albert Willian. **Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezoelétricos**: implementação computacional e avaliação numérica. 2006. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

FERNANDES, Tales Gouveia; PANAZIO, Aline Neves. Do Analógico ao Digital: Amostragem, Quantização e Codificação. **II Simpósio de Iniciação Científica da Universidade Federal do ABC**, 2009. Disponível em: <ic.ufabc.edu.br/II_SIC_UFABC/resumos/paper_5_74.pdf>. Acesso em: 4 Nov 2019.

FERREIRA, Thiago et al. Determinação das Velocidades de Propagação Longitudinal e Transversal do Sinal Ultrassônico em Diferentes Tipos de Aço, 2010. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b1d5/8a029ed45671b0f1a5a3a6b8c212f7b82f0d.pdf>>. Acesso em: 3 Nov 2019.

FLOYD, Thomas L. **Sistemas digitais: fundamentos e aplicações**. Tradução de José Lucimar do Nascimento. 9ª. ed. Porto Alegre: Bookmen Companhia Editora Ltda, 2009.

GIROD, B.; RABENSTEIN, R.; STENGER, A. **Sinais e sistemas**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GOMES, Ruan D. et al. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 4, n. 1, p. 1-12, Jul 2014.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, v. 2, 2012.

JHA, Pranav Kumar; MISHRA, Neha; KUMAR, D. Sriram. Challenges and potentials for visible light communications: State of the art. **AIP Conference Proceedings**, Tiruchirappalli, p. 020007. 2 Jun 2017. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4984154>. Acesso em: 4 Nov 2019.

LI, Chuan; HUTCHINS, David A.; GREEN, Roger J. Short-Range Ultrasonic Digital Communications in Air. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 55, n. 4 Abr 2008.

LU, Bin; GUNGOR, Vehbi C. Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 11, p. 4651-4659. Nov 2009.

MATHWORKS, INC. Fit curves and surfaces to data - MATLAB. **MathWorks**, 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>>. Acesso em: 23 março 2022.

NEUMANN, Fabiano Berlinck et al. **Princípios de Comunicação de Dados [recurso eletrônico]**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. revisão técnica: Júlia Mara Colleoni Couto.

OASIS MQTT TECHNICAL COMMITTEE. **MQTT: The Standard for IoT Messaging**, 2022. Disponível em: <<https://mqtt.org/>>. Acesso em: 19 março 2022.

PIUBELLI, Sérgio Luiz et al. Simulador de Propagação de Ondas Mecânicas em Meios Sólidos para o Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Campo Grande, v. 32, n. 1, p. 1501-1-1501-6, 3 Mar 2013.

PRODANOV, Cleber Cristiano. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2^a. ed. Nova Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

REYNDERS, Brecht; MEERT, Wannes; POLLIN, Sofie. Rand and Coexistence Analysis of Long Range Unlicensed Communication. **In: 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)**, Heverlee 2016.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson D. As Revoluções Industriais até a Indústria 4.0. **Interface Tecnológica**, v. 15, n. 2, p. 480-491, 30 dez. 2018.

SANTOS, Sergio T. D. **Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento e Controle**. 2007. Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/Sergio07/Sergio07.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

SCHMITZ, Claudio Ramos. **Desenvolvimento de dispositivos para amplificação e pré-amplificação de sinais, para utilização em um sistema de comunicação por ultrassom através de paredes metálicas**. 2013. 84p. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. 2004. Fortaleza: Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. O que é PWM e Para que Serve? **Citisystems**, 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em: 03 Nov 2019.