



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia Industrial 4.0



Juliano Rodrigues Dourado
Lincoln Batista
Lucas Donadel Ribeiro

**DETECÇÃO DE VAZAMENTOS DE AR COMPRIMIDO INTELIGENTE:
SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO COM CURTO PRAZO DE RETORNO**

**CURITIBA
2022**



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Engenharia Industrial 4.0



Juliano Rodrigues Dourado

Lincoln Batista

Lucas Donadel Ribeiro

**DETECÇÃO DE VAZAMENTOS DE AR COMPRIMIDO INTELIGENTE:
SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO COM CURTO PRAZO DE RETORNO**

Monografia apresentada como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia Industrial 4.0. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Deivid Valle

Co - Orientador: Prof. Dr. Alexandre A. Pescador Sardá

CURITIBA
2022

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradecemos a Deus que nos deu vida, saúde e a oportunidade de chegar até aqui.

Aos nossos pais, pois sem eles, nem os primeiros caracteres escritos neste trabalho existiriam.

Ao professor Pablo Deivid Valle, que desde o dia inaugural da especialização, nos inspirou, nos apoiou, e deu suporte contínuo, sempre com muita boa vontade e vontade de servir e nos ver decolando, até a indicação de excelentes professores que foram de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho e de nossas carreiras.

Agradecemos aos professor Alexandre Pescador, por sua insistência e paciência em nos fazer entender os princípios complexos envolvidos no que estávamos querendo propor, por toda a disposição e empenho em buscar insumos e softwares para que pudéssemos avançar no trabalho, mesmo com a pandemia, disponibilizou o laboratório para nós dedicando horas preciosas de seu fim de semana, e por fim, o mesmo fez o professor João Morais da Silva Neto, ao qual agradecemos por toda a disposição de ir até mesmo conosco a 24 de Maio para buscar componentes para que não trava-se o projeto. Agradecemos, também, o Lucas (Siemens) que foi muito solícito no suporte para a utilização do software LMS TestLab Simcenter o qual foi fundamental para a realização deste trabalho. Grande honra e satisfação ter conhecido, convivido um pouco, conhecido algumas histórias e tanto aprendido com as feras mencionadas acima, incluindo é claro nossos pais.

Agradecemos também ao professor Mauricio Guy de Andrade, que nos apresentou o case da C-Vale e nos auxiliou a iniciar o estudo, que motivou esse trabalho, bem como ao professor Eduardo Lucas Konrad Burin que orientou, acompanhou e ainda nós ajudar a conseguir um recurso muito importante em tempos de pandemia para vencer os 600 km de estrada entre Curitiba e Palotina, um estagiário para fazer todo o levantamento de campo, o Lucas Melo Alves, ao qual também devemos agradecer por ser fundamental a motivação inicial deste trabalho. Gostaríamos também de agradecer ao Raul Victor Caetano Furquim, Claudio Manoel de Campos Filho, Paulo Ricardo Holz e Neivaldo Francisco Burin, por todo o apoio, por abrirem as portas, por aceitar a proposta e nós permitirem ser referência para estudo dessa dor.

RESUMO

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS DE AR COMPRIMIDO INTELIGENTE: SOLUÇÃO DE BAIXO CUSTO COM CURTO PRAZO DE RETORNO

AUTORES: Juliano Dourado; Lincoln Batista; Lucas Donadel Ribeiro
ORIENTADORES: Prof. Dr. Pablo Deivid Valle; Prof. Dr. Alexandre Pescador

A indústria 4.0 e o emprego de novas tecnologias vêm possibilitando a redução de desperdícios com a solução de diversos problemas antigos enfrentados pela indústria de modo geral, dentre eles as perdas pelo consumo desnecessário de energia elétrica. As redes pneumáticas que são amplamente utilizadas pela indústria nas mais diversas aplicações podem ser também grandes fontes de desperdício de energia se houverem vazamentos ao longo de suas tubulações, sejam por danos às mesmas ou simplesmente pelo mal dimensionamento de suas conexões. A detecção de vazamentos em redes de ar comprimido pode não ser perceptível ao ser humano em muitos casos, sendo necessária a aquisição de instrumentos que possuem um alto custo. Dessa forma o desenvolvimento de um sistema de baixo custo que seja capaz de detectar a maior parte dos vazamentos que são imperceptíveis ao ser humano pode auxiliar grande parte das indústrias a reduzirem o desperdício de energia elétrica. Neste trabalho, realizou-se experimentos visando compreender o espectro dos sinais emitidos por vazamentos em redes de ar comprimido de acordo com a dimensão dos furos por onde o vazamento ocorre e propôs-se um sistema de baixo custo com uma interface gráfica visando detectar e indicar em tempo real grande parte de possíveis vazamentos que uma rede de ar comprimido possa possuir. Por fim, o estudo do espectro do ruído mostrou um comportamento concentrado em uma faixa de frequência ultrassônica indicando que o uso de uma solução de baixo custo pode ser viável e auxiliar na redução do desperdício de energia elétrica em grande parte das indústrias.

Palavras-chave: Detecção de Vazamentos de ar comprimido. Frequências ultrassônicas. Indústria 4.0. Eficiência Energética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um compressor de ar	9
Figura 2 - Exemplo de rede industrial de ar comprimido	10
Figura 3 - Instrumentos comerciais para detecção de vazamentos.....	11
Figura 4 - Placa de desenvolvimento Arduino Uno.....	12
Figura 5 - Exemplo de dashboard construída com Node-RED.....	13
Figura 6 - Amplificador operacional LM741	14
Figura 7 - Sensor ultrassônico HC-SR04	15
Figura 8 - Indicação de grau de proteção	16
Figura 9 - Tabela de grau de proteção	17
Figura 10 - Modelo FLUKE ii900	22
Figura 11 – Modelo FLIR Si124.....	22
Figura 12 - Modelo CS Instruments LD400	23
Figura 13 - Esquemático da matriz QFD	24
Figura 14 - Arquitetura de solução	27
Figura 15 - Matriz SWOT da proposta de produto/negócio	28
Figura 16 - Circuito amplificador de sinal	29
Figura 17 - Circuito amplificador de sinal	29
Figura 18 - Esquema criado para interface gráfica.....	30
Figura 19 - Interface gráfica (dashboard) para indicação de detecção de vazamento	30
Figura 20 - Árvore de testes em laboratório	31
Figura 21 - Esquemático do setup de testes em laboratório.....	34
Figura 22 - Equipamentos utilizados nas medições	34
Figura 23 - Características físicas do microfone Deltatron	35
Figura 24 - Equipamento compressor de ar	35
Figura 25 – Espectro e análise do sinal de vazamento com furo de 1mm a 0,5m de distância do sensor	36
Figura 26 - Medição A - furo de 1mm a 0,5m de distância do sensor;	37
Figura 27 - Comparativo entre ruído de fundo e medição A.....	37
Figura 28 - Medição B1- furo 0,5mm 0,5m	38
Figura 29 - Medição C1- furo 0,1mm 0,5m.....	39

Figura 30 - Medição C22 - vazamento com válvula aberta	40
Figura 31 - Medição D11 - compressor ligado.....	40
Figura 32 - Compressor ligado + furo 0,1mm 0,5m	41
Figura 33 - F1- furo 0,1mm a 2m.....	41
Figura 34 - Testes realizados com protótipo implementado em matriz de contatos .	43
Figura 35 - Tela da interface gráfica desenvolvida indicando a presença de um sinal ultrassônico oriundo do vazamento de ar.....	43
Figura 36 - Modelos 3d de case projetados para possível enclausuramento do protótipo	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais necessidades/requisitos da indústria para a proposta solução	32
Tabela 2 - Requisitos do produto	32
Tabela 3 - Principais requisitos do projeto	33

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO	7
1.2.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	7
1.3.	JUSTIFICATIVA	8
1.4.	HIPÓTESE	8
1.5.	OBJETIVO	8
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1.	AR COMPRIMIDO E REDES INDUSTRIAIS	9
2.2.	PLACA DE PROTOTIPAGEM – ARDUINO	11
2.3.	Node-RED	13
2.4.	AMPLIFICADORES DE SINAL	13
2.5.	SENSORES ULTRASSÔNICOS	14
2.6.	GRAU DE PROTEÇÃO	16
2.7.	RUÍDO ULTRASSÔNICO	17
2.7.1.	Eliminação do ruído de fundo	18
2.8.	MODELAGEM 3D / IMPRESSÃO 3D / CÁLCULO DE CUSTOS	19
3.	METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	20
3.1.	METODOLOGIA	20
3.2.	PROJETO CONCEITUAL	23
3.2.1	Matriz QFD	23
3.2.2	Requisitos do Cliente	24
3.2.3	Requisitos do projeto	25
3.3	PROJETO PRELIMINAR	25
3.3.1	Arquitetura da solução	26
3.3.2	Matriz SWOT	27

3.4 PROJETO DETALHADO	28
3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 REQUISITOS DA PROPOSTA - SOLUÇÃO	32
4.2 MEDIÇÕES DE ESPECTRO	33
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO - MVP	41
5. CONCLUSÕES	44
Sugestões de trabalhos futuro	45
6. REFERÊNCIAS	47
7. ANEXOS	49
ANEXO A	49

1.INTRODUÇÃO

1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO

O emprego de novas tecnologias que possibilitem maximizar o uso racional de recursos ambientais reduzindo desperdícios e otimizando os sistemas produtivos, além de potencializar os lucros de uma corporação é de fundamental importância também quanto ao futuro do planeta, pois embora fontes de energia consideradas limpas estejam ganhando cada vez mais espaço, ainda é grande o número de usinas e sistemas de geração de energia elétrica que causam grande impacto ambiental, por exemplo as que se utilizam de combustíveis fósseis poluindo o ar com a emissão de gases, utilizando-se de um recurso não renovável.

A economia de energia e o emprego de sistemas mais sustentáveis vem se tornando uma pauta cada vez mais frequente quando se fala em indústria 4.0. A grande variedade de componentes eletrônicos e a fácil integração dos mesmos com sistemas microcontrolados vêm possibilitando monitorar e inspecionar possíveis falhas e desperdícios em plantas industriais, permitindo que ações sejam tomadas de maneira rápida e direcionada à fonte do problema.

1.2.FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Dentre os sistemas de movimentação mais utilizados pelas indústrias estão os sistemas pneumáticos. Utilizando-se de redes de ar comprimido das mais diversas dimensões, uma tubulação pode se estender ao longo de uma planta industrial inteira canalizando ar comprimido para as máquinas e equipamentos que estejam dispostos e necessitam do mesmo para realizar suas funções. Dessa forma, quanto maior a rede maiores também serão os riscos de perdas de carga que possam ocorrer no sistema, seja pelo mau dimensionamento dos tubos, seja pelo acréscimo de derivações e conexões e vazamentos de ar que possam ocorrer. Quanto maiores as perdas, maior será o esforço e o consumo de energia elétrica que o compressor responsável pela pressurização da rede irá consumir para manter a pressão de trabalho de um determinado sistema.

1.3.JUSTIFICATIVA

Um pequeno vazamento em uma tubulação de ar comprimido pode gerar um enorme prejuízo a uma determinada empresa e o uso de equipamentos que possam monitorar e detectar vazamentos podem evitar esse prejuízo. Existem diversas soluções comerciais para a detecção de vazamentos que utilizam de recursos altamente tecnológicos para tais, como uma grande quantidade de sensores, câmeras térmicas e softwares de precisão, porém o alto custo desses equipamentos bem como a disponibilização de um operador para monitorar manualmente as redes com uma determinada frequência pode tornar a aquisição desses equipamentos inviável para algumas indústrias.

1.4.HIPÓTESE

O desenvolvimento de uma solução de baixo custo que seja capaz de identificar uma grande parte dos vazamentos possuindo monitoramento remoto pode se apresentar como uma boa solução para a economia em uma planta industrial. Kits de desenvolvimento de baixo custo, com bibliotecas *Open-Source* para determinados sensores e com fácil integração para aplicativos de interface gráfica possuem capacidade de processamento e recursos para auxiliar na resolução do problema.

1.5.OBJETIVO

Analisar o espectro do som emitido por pequenos vazamentos inaudíveis e imperceptíveis ao ser humano e propor uma solução inteligente de baixo custo que permita detectar grande parte desses vazamentos gerando um rápido ganho e retorno ao investimento.

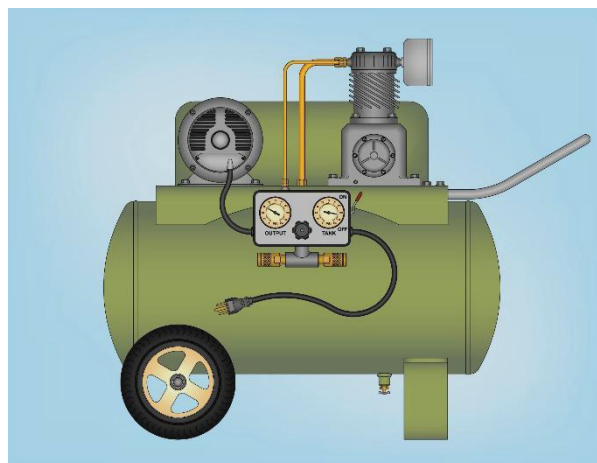
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.AR COMPRIMIDO E REDES INDUSTRIAIS

O ar atmosférico é composto por uma mistura de gases sendo em sua maioria nitrogênio e oxigênio, possuindo algumas propriedades como a expansibilidade, a compressibilidade e a elasticidade. Essas propriedades permitem que o mesmo seja utilizado para armazenar e transmitir energia, resultando em trabalhos mecânicos. Dessa forma, o ar comprimido é amplamente utilizado pela indústria em aplicações das mais diversas, como por exemplo em equipamentos de prensagem, lavadoras elétricas e sopradores.

Para gerar o ar comprimido utiliza-se de um equipamento denominado compressor que está representado na Figura 1. Conforme Parker (2007, p.10) “Compressores são máquinas destinadas a elevar a pressão de um certo volume de ar, admitido nas condições atmosféricas, até uma determinada pressão, exigida na execução dos trabalhos realizados pelo ar comprimido”.

Figura 1 - Ilustração de um compressor de ar



Fonte: Página da wikipédia¹

Uma indústria que utiliza de muitos acionamentos pneumáticos em suas máquinas e equipamentos distribuídos ao longo de sua planta necessita construir uma rede industrial de ar comprimido. A rede industrial de ar comprimido consiste

basicamente na canalização do ar a partir do respectivo compressor utilizado, levando o mesmo a alimentar as entradas pneumáticas das máquinas que possuem esse tipo de mecanismo. A Figura 2 ilustra um exemplo de uma rede industrial de ar comprimido.

Figura 2 - Exemplo de rede industrial de ar comprimido



Fonte: Página da tecniar²

O uso de ar comprimido e suas redes possuem diversas vantagens como o custo relativamente baixo na implantação em comparação com outros sistemas e fácil manipulação por parte de operadores e manutentores por exemplo, e, também, diversas desvantagens como forças insuficientes para determinados processos, por exemplo. Uma desvantagem que merece destaque é a difícil detecção de minúsculos vazamentos. Como o ar atmosférico é incolor e inodoro e um pequeno vazamento pode não emitir ruído audível perceptível, a detecção de vazamentos sem o uso de um instrumento adequado pode ser muito difícil ou impossível.

Uma das principais características dos pequenos vazamentos de ar comprimido são a emissão de sinais ultrassônicos compreendidos normalmente centralizados em uma faixa de frequência de 40kHz. Dessa forma, o uso de instrumentos que detectem sinais em faixas de frequência ultrassônicas se torna fundamental na detecção de vazamentos em tubulações de ar comprimido.

Existem alguns equipamentos que são comercializados e que permitem detectar pequenos vazamentos que sejam imperceptíveis. Esses equipamentos, de modo geral, utilizam-se de sensores capazes de detectar as frequências ultrassônicas emitidas pelo vazamento. A Figura 3 ilustra dois instrumentos comerciais utilizados na detecção de vazamentos de ar comprimido, sendo o modelo Leakshooter LKS 1000 v.3 à esquerda e o modelo ii900 da Fluke à direita.

Figura 3 - Instrumentos comerciais para detecção de vazamentos



Fonte: Página da Synergys e página da Fluke³

“A detecção de vazamento de ar percorreu um longo caminho nos últimos anos, desde a verificação de vazamentos com um pano ensaboado, até hoje, onde o ultrassom é um método confiável de detectar vazamentos. A detecção de vazamento de ultrassom em sua forma mais básica envolve um inspetor andando em uma planta industrial, detectando vazamentos e identificando-os para posterior correção.” (FERREIRA, 2020, p.57).

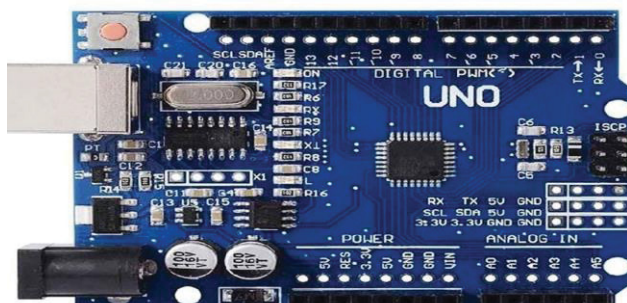
2.2.PLACA DE PROTOTIPAGEM – ARDUINO

Para desenvolver uma aplicação de um circuito eletrônico microcontrolado, se faz necessária que diversas versões tanto de hardware quanto de software sejam

elaboradas e testadas, muitas vezes integrando diversos periféricos como portas de comunicação UART, circuitos geradores de Modulação de Pulso, dentre outros. Ou seja, para que se tenha um produto final confiável e devidamente testado, muitos componentes precisam ser adquiridos, soldados em placas perfuradas e ou de circuito impresso e muitas vezes destruídos a cada nova versão. Para esse fim, desenvolvedores elaboraram os chamados kits de desenvolvimento ou placas de prototipagem, onde se torna possível uma montagem provisória e não destrutiva de diversas versões de um determinado produto de maneira simplificada. As placas de prototipagem, de modo geral, são confeccionadas com um microcontrolador base e com alguns periféricos já integrados, além de pontos de conexão rápida para cabos comercializados para tal fim. E entre os principais kits de desenvolvimento se encontra o Arduino.

O Arduino é um kit de desenvolvimento livre, de baixo custo, amplamente divulgado e utilizado e que conta com diversas bibliotecas de código com funções específicas para alguns dos sensores mais utilizados em aplicações profissionais e didáticas e recreativas. O Arduino possui diversos modelos, cada um deles com um conjunto de especificações distintas, sendo o Arduino UNO o modelo com maior popularidade. O Arduino UNO conta com microcontrolador ATmega 328, possui tensão de operação de 5 volts, 14 pinos de entradas digitais compartilhados com 6 pinos que podem ser configurados como PWM, 6 pinos de entradas analógicas, além de porta USB.

Figura 4 - Placa de desenvolvimento Arduino Uno



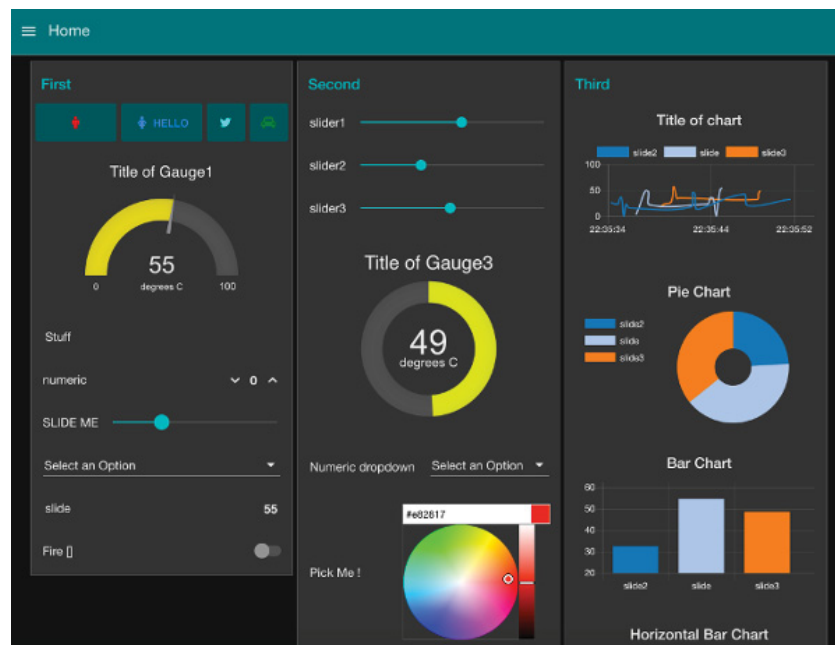
Fonte: Página da casa da robótica³

2.3.Node-RED

O Node-RED é uma ferramenta focada em IOT que foi desenvolvida para criar aplicações com fluxo de dados e conectar dispositivos. Segundo (Kawamura, 2017) “O Node-RED apresenta uma interface simples, pode-se desenvolver diversos projetos através de customização dos NODES. Sendo possível controlar objetos em tempo real, desde tarefas domésticas como apagar a luz com uma postagem no Twitter ou então acionar o alarme do carro através de um dispositivo móvel. Além disso, pode se programar para realizar tal comando a partir de um horário de um determinado dia.”

A facilidade com a qual é possível criar Dashboards é um dos grandes destaques do Node-RED. Desde aplicações simples até as mais complexas existem recursos que auxiliam significativamente na construção das interfaces.

Figura 5 - Exemplo de dashboard construída com Node-RED



Fonte: Página da node-red library³

2.4.AMPLIFICADORES DE SINAL

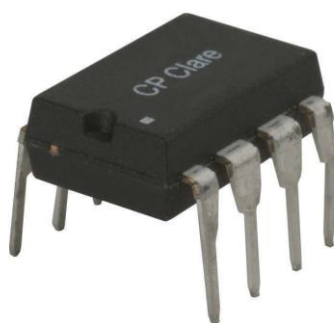
Um amplificador de sinal é um elemento responsável por amplificar ou atenuar um sinal elétrico com base em uma função que relaciona entrada e saída. Essa função

é denominada função de transferência e possui influência de acordo com a frequência do sinal aplicado, alterando a sua magnitude de acordo com a aplicação e os elementos utilizados em seu projeto. Os amplificadores de sinais podem ser projetados e construídos utilizando-se de componentes discretos elementares como transistores, resistores e capacitores por exemplo, como também podem ser encontrados comercialmente em forma de circuitos integrados conhecidos também como *Amp-Ops*, que além de amplificar um sinal, podem realizar operações matemáticas como diferenciação, soma de dois ou mais sinais distintos e etc.

Segundo Wendling (2010, p.4) “É muito difícil enumerar a totalidade das aplicações desse fantástico componente denominado amplificador operacional. De modo geral, podemos dizer que suas aplicações estão presentes nos sistemas eletrônicos de controle industrial, na instrumentação médica (eletromedicina ou bioeletrônica), nos equipamentos de telecomunicações, nos equipamentos de áudio, nos sistemas de aquisição de dados, etc.”

Os modelos comerciais mais comuns de amplificadores operacionais são o LM741, LM324 E LM393. A Figura 5 apresenta o modelo de amplificador operacional LM741.

Figura 6 - Amplificador operacional LM741



Fonte: Página da eletrônica castro

2.5.SENSORES ULTRASSÔNICOS

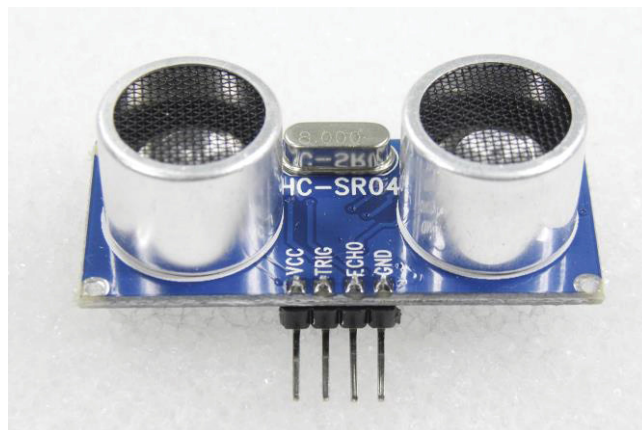
Os sensores ultrassônicos são sensores capazes de identificar sinais elétricos em faixas de frequência superiores à audível pelo ser humano (até 20KHz). Sua construção é feita utilizando-se de cristais piezoelétricos, com propriedades de emissão de sinais elétricos a partir de vibrações incidentes sobre o mesmo superiores à 20kHz.

Os sensores ultrassônicos são amplamente utilizados em aplicações para a detecção de objetos e a medição de distância entre dois pontos utilizando-se do chamado pulso-eco, onde um sinal ultrassônico é emitido por um transmissor, incide sobre o possível objeto de medição e retorna ao receptor. O tempo entre a emissão e a recepção do sinal é utilizado para inferência sobre essas aplicações.

A Figura 6 ilustra um modelo de sensor comercial, o HC-SR04 que utiliza o conceito de pulso-eco já integrado ao mesmo, com um cristal oscilante, um transmissor e um receptor de ondas ultrassônicas próximas à 40kHz.

Embora as aplicações citadas sejam as mais utilizadas pela indústria, merecem destaque também as aplicações utilizando sensores ultrassônicos para detecção da presença de sinais ultrassônicos em um determinado meio, podendo indicar vazamentos de ar imperceptíveis, por exemplo.

Figura 7 - Sensor ultrassônico HC-SR04



Fonte: Página da labdegaragem

2.6.GRAU DE PROTEÇÃO

O grau de proteção IP (International *Protection*) é um padrão internacional definido pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) com a finalidade de classificar o nível de proteção de produtos eletrônicos contra ingresso de água e poeira em partes internas do produto.

Essa classificação é importante, principalmente, para produtos de aplicação industrial, em que é comum o uso em ambientes agressivos (presença de poeira e/ou vapor d'água, por exemplo).

O código de classificação IP é constituído de dois numerais característicos mais um dígito suplementar não obrigatório.

Figura 8 - Indicação de grau de proteção



Fonte: ACC Engenharia de Medição; disponível em: <https://accmetrologia.com.br/voce-sabe-o-que-e-grau-de-protecao-ip/> acessado em 15/12/2021.

O 1º dígito faz referência às partículas sólidas, enquanto o 2º dígito especifica a proteção do produto contra água. De modo geral, quanto maior o dígito maior a proteção contra pequenas partículas sólidas e a imersão em líquidos. O 3º dígito é utilizado para especificar alguma proteção particular. Na Figura 9 é especificado cada característica dos numerais de proteção.

Figura 9 - Tabela de grau de proteção

1º Numeral
Grau de proteção contra objetos sólidos

GRAU DE PROTEÇÃO

2º Numeral

Grau de proteção contra água

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Não protegido	Protegido contra quedas verticais de gotas d'água	Protegido contra quedas verticais de gotas d'água para uma inclinação máxima de 15 graus	Protegido contra água aspersa de um ângulo de 60 graus	Protegido contra projeções de água	Protegido contra jatos d'água	Protegido contra jatos potentes de água	Protegido contra imersão temporária submersão	Protegido contra imersão permanente
									
0	IP 00	IP 01	IP 02	10 l/min 80 kN/m²	10 l/min 80 kN/m²	12,5 l/min 30 kN/m²	12,5 l/min 30 kN/m²		
1	IP 10	IP 11	IP 12	IP 13					
2	IP 20	IP 21	IP 22	IP 23					
3	IP 30	IP 31	IP 32	IP 33	IP 34				
4	IP 40	IP 41	IP 42	IP 43	IP 44	IP 45	IP 46		
5					IP 54	IP 55	IP 56		
6						IP 65	IP 66	IP 67	IP 68

Protegido contra objetos sólidos com Ø maior que 50mm

Protegido contra objetos sólidos com Ø maior que 12mm

Protegido contra objetos sólidos com Ø maior que 2,5mm

Protegido contra objetos sólidos com Ø maior que 1mm

Protegido contra poeira depositada: 200mm de coluna d'água
Máxima aspiração de ar: 80 vezes o volume do invólucro

Totamente protegido contra a poeira.
Mesmo procedimento de teste

Fonte: adaptado de ACC Engenharia de Medição; disponível em: <https://accmetrologia.com.br/voce-sabe-o-que-e-grau-de-protecao-ip/> acessado em 15/12/2021.

A validação do grau de proteção do produto é feita conforme metodologia de ensaio descrita na norma ABNT NBR IEC 60529.

2.7.RUÍDO ULTRASSÔNICO

No texto publicado em 11 de Setembro de 2018 no site Plant Services são citadas algumas formas genéricas de tecnologias ultrassônicas, pulso/eco, energia e transmissão por ar/estrutura. Segundo o texto, a tecnologia mais reconhecida é por pulso/echo.

O Texto relaciona o ar comprimido com um limpador ultrassônico, onde são emitidas ondas sonoras de alta frequência. Estas ondas sonoras de alta frequência têm energia, e limpam peças e materiais diversos, onde a forma de tecnologia de ultrassom que é usada para a detecção de vazamento de ar comprimido é o ultrassom transmitido pelo ar, que depende de ondas sonoras de alta frequência que estão acima da faixa da audição humana normal.

Os seres humanos são capazes de receber som dentro de uma faixa de frequência de 20 Hertz (Hz) a 20 quilohertz (kHz), com o limiar superior da audição humana normal entre 16 kHz e 17 kHz. A faixa ultrassônica começa em 20 kHz. A maioria dos instrumentos de ultrassom é capaz de receber ou sentir essas ondas sonoras de ultrassom de alta frequência dentro de uma faixa de frequência de 20 kHz a 100 kHz.

Para detecção de vazamento ultrassônico, recomenda-se um instrumento de ultrassom com capacidade de sintonia de frequência, e o ajuste de frequência sugerido é de 40 kHz. Para instrumentos de ultrassom que estão em uma frequência fixa ou onde o ajuste de frequência não é uma característica, 38 kHz é normalmente o ajuste de frequência no qual o instrumento é fixo.

Existem alguns estudos e soluções no mercado que se utilizam dos conceitos comentados neste tópico para visualizar o ruído específico do ar comprimido mesmo em meio a um ambiente industrial onde o ruído de fundo típico costuma ter banda larga o que dificulta a identificação de vazamentos.

2.7.1. Eliminação do ruído de fundo

Em um texto publicado em 30 de novembro de 2020 no site da Teledyne Flir, foi apresentado o conceito utilizado em sua solução que une a detecção do ruído a geração de imagens para identificação do ruído do vazamento de ar comprimido, o qual se apresenta em frequências que vão desde as audíveis até as ultrassônicas, como nas instalações industriais observa-se vários níveis de ruído de fundo, seria quase impossível um ouvido humano captar um vazamento de ar e portanto recorre-se ao fato de que esse tipo de ruído fabril interfere menos em altas frequências para então encontrar uma janela de banda de frequência onde é tecnicamente viável detectar os menores vazamentos a distâncias bem longas, o grande desafio aqui é encontrar maneiras de diferenciar as fontes sonoras que se assemelham a um vazamento de outras fontes sonoras de interferência.

Nesse mesmo texto é comentado sobre a influência da quantidade de microfones na precisão da detecção de ruídos em sistemas de gás pressurizados, onde foram comparados três cenários, sendo eles com 1, 32 e 124 microfones, onde foram identificados dois picos a diferentes frequências que significam vazamentos

com a quantidade maior de microfones, ao invés de apenas um pico percebido com o uso de 32 microfones, e nesse cenário não foi identificado nenhum dos dois picos com apenas um microfone. Concluindo desse modo que quanto maior o número de microfones melhor será o desempenho acústico do sistema.

2.8. MODELAGEM 3D / IMPRESSÃO 3D / CÁLCULO DE CUSTOS

A cada dia tem se tornado mais presente no dia a dia das engenharias o uso de manufatura inteligente, uma parte considerável do desafio desse projeto pode ser resolvida de forma eficiente e com baixo custo graças ao uso das tecnologias que esse novo universo agrega aos desenvolvimentos.

Em Aires, M (2019) é abordado o passo a passo padrão que se segue em um processo de manufatura aditiva, onde é necessário fazer a elaboração de um modelo da peça a ser produzida concebido por algum software CAD, representando-o numa superfície sólida em 3D, converter o modelo para o formato STL, Standard Tessellation Language, depois com o auxílio de um software de fatiamento é preparado o arquivo, bem como são configurados parâmetros que são específicos para diferentes aplicações.

Essa ferramenta também é um grande auxílio no aspecto de previsão de custos, pois no software de fatiamento é possível calcular o custo de material para a peça modelada, antes mesmo de fabricá-la. Importante salientar que a impressão 3D nem sempre é o meio mais viável de prototipagem, precisa ser sempre comparado às outras opções de fabricação.

No artigo publicado em BARROS, G (2012) se afirmou que a redução de preços dos equipamentos da prototipagem rápida e o nascimento de novas tecnologias nesta área podem mudar a maneira que os produtos são desenvolvidos criando até mesmo possibilidades de criar logísticas mais favoráveis, como a fabricação local com base no modelo matemático 3D, bem como falou-se nas diversos processos disponíveis para realizar a impressão 3D por adição de material, onde a os mais conhecidos e difundidos atualmente são FDM, Fused Deposition Modeling ou Modelagem de Deposição Fundida e SLA, Steereolithography Apparatus ou Estereolitografia ou ainda do Grego Stereon(Sólido), Lithos (Pedra) e Graphy (escrita).

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1.METODOLOGIA

Esse trabalho nasceu da observação de uma “dor” percebida na indústria, onde iniciou-se um estudo de caso proposto após ter sido divulgado um banco de oportunidades pelo professor Mauricio Guy que lecionava Agricultura de Precisão - Agro 4.0, módulo da especialização em engenharia industrial 4.0 da UFPR.

A empresa que buscava solução para sua “dor” foi a C-Vale, o tema na área de energia: "Aves: Levantamento e redimensionar de todo o consumo de ar comprimido, propondo melhorias em tubulações e sanar vazamentos / Diminuição de carga na sala de máquinas referente a ar comprimido".

Acreditando poder resolver essa dor com a soma da experiência possuída com a proposta de aplicação de tecnologias conhecidas durante a especialização que a revolução da indústria tem fomentado industrial, foi iniciado o trabalho de entendimento do problema, do cenário e contexto, incluindo visita ao abatedouro de frangos que fica em Palotina-PR, onde foi alinhado um plano de trabalho com o apoio do professor Eduardo Lucas Konrad Burin da UFPR de Palotina, que além de todo o suporte conseguiu um recurso humano, aluno de graduação em engenharia de energia(Lucas Melo), e do professor Pablo Deivid Valle, os quais gentilmente cederam seu tempo para nos assessorar e conduzir durante o trabalho, com essa equipe formada foi possível levantar dados em campo, realizar desenhos para análise de causa e estudo de soluções do problema, bem como foram feitos os cálculos de perda de carga para que fossem propostas melhorias no sistema de ar comprimido.

Em meio a esse trabalho notou-se que apesar de existirem diversas soluções no mercado, o alto custo acaba por tornar muito difícil obter aprovação de verba nesse grupo, assim como em muitas outras empresas, a exemplo das empresas que os integrantes do grupo trabalham. Assim sendo, notou-se uma oportunidade de estudar uma solução de baixo custo que se tornou viável com o uso das tecnologias da indústria 4.0 e a partir disso iniciou-se a estudar uma solução 4.0 de baixo custo para detecção de vazamento de ar comprimido em indústrias.

Conforme mencionado no item 3.1, existem diversas soluções comerciais de equipamentos para detecção de vazamentos em tubulações de ar comprimido. Algumas opções foram analisadas quanto ao seu sistema de funcionamento e custos.

O primeiro modelo analisado foi o gerador de imagens industrial ultrassônico da fabricante Fluke, modelo ii900. O equipamento possui 64 microfones digitais para captação de sinais que variam de 2 kHz à 52 kHz, conseguindo detectar vazamentos de até 150 ml/min pressurizados em 700 kPa a uma distância de até 10 metros. O instrumento possui também um display para visualização com destaque de cor para a área em que o vazamento foi detectado. O custo para aquisição do equipamento é de aproximadamente R\$110.811,56 além de custos de taxas de importação conforme cotação do dólar no dia 22/01/2022. A **Figura 10** ilustra o modelo ii900.

O segundo modelo analisado foi o Si124 da fabricante FLIR. O equipamento conta com 124 microfones digitais de baixo ruído para detecção de sinais com faixa de frequência ajustável de até 31kHz. Possui display para visualização com indicação da taxa de vazamento em tempo real. O instrumento é capaz de detectar um vazamento de até 50 ml/min com pressão de até 300 kPa a uma distância de até 10 metros. O custo para aquisição do equipamento é de aproximadamente R\$ 81.875,04 além de taxas de importação, conforme cotação do dólar no dia 22/01/2022. A Figura 10 ilustra o modelo Si124.

O terceiro modelo analisado foi o LD400 da fabricante CS Instruments. De construção e recursos mais limitados em comparação com os dois primeiros modelos analisados, o LD400 faz a conversão do sinal ultrassônico detectado para uma faixa de frequência audível para o ser humano e emite o som para um headset conectado ao instrumento. Possui frequência de detecção de 40 kHz com variação de 2 kHz e display para configurações. A faixa de detecção com relação a distância não é informada pelo fabricante. O custo do equipamento é de aproximadamente R\$ 23.400,00 já com as taxas de importação conforme cotação realizada no dia 15/06/2021. A Figura 11 ilustra o modelo LD400.

Figura 10 - Modelo FLUKE ii900



Fonte: Página da fluke

Figura 11 – Modelo FLIR Si124



Fonte: Página da FLIR

Figura 12 - Modelo CS Instruments LD400



Fonte: Página da CS Instruments

3.2.PROJETO CONCEITUAL

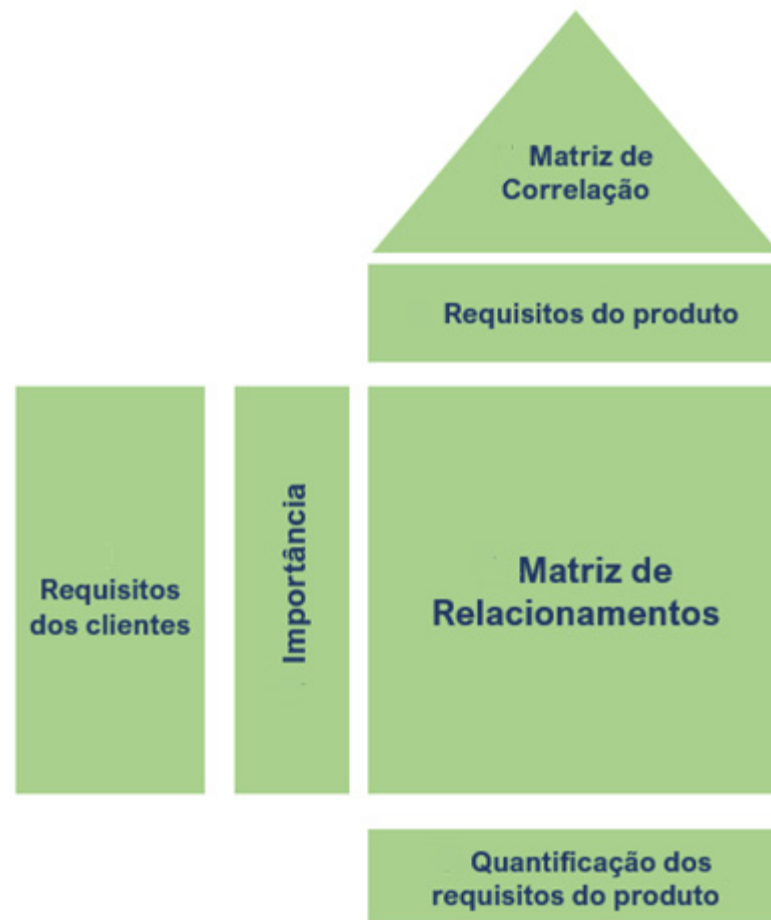
Constatado a existência de uma necessidade da Indústria e a baixa aderência de soluções no mercado a um preço competitivo, em especial, para pequenas e médias empresas evidenciou-se uma lacuna de oferta do mercado para este nicho. O escopo de delineamento da solução partiu de premissas as quais foram estruturadas seguindo o método da Matriz QFD.

3.2.1 Matriz QFD

Os requisitos do projeto foram mapeados utilizando a ferramenta de QFD (Quality Function Deployment), também conhecida como casa da qualidade. Esse método tem como principal objetivo garantir a qualidade do produto, e que os requisitos do cliente sejam atendidos no desenvolvimento da solução.

Na **Figura 13** é esquematizado os principais elementos que compõem a matriz QFD. No trabalho utilizamos esse esquema simplificado, sem a relação da proposta-solução com os principais players do mercado, visto que, são produtos de nichos diferentes.

Figura 13 - Esquemático da matriz QFD



Fonte: Adaptado de Nomus industrial. disponível em: <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/matriz-qfd/> acessado em 18/12/2021

3.2.2 Requisitos do Cliente

A partir de uma pesquisa de campo realizada na empresa C.Vale e com Engenheiros das empresas Denso, Furukawa e Weg conseguimos elencar algumas características desejáveis pela indústria para uma proposta de solução.

Os itens foram selecionados com base em brainstorm realizado com colaboradores das três empresas, as quais todas já possuem algum contato com o ambiente industrial 4.0.

Conhecendo os requisitos mínimos e necessidades da indústria, além de criar uma persona como principal cliente foi elencado os principais requisitos do produto que direcionaria o desenvolvimento da solução do protótipo.

Os requisitos do cliente foram elencados em ordem de importância e mensurado um nível de percepção de valor ao cliente dentre 1 a 5, sendo que 5 é a

maior percepção de valor do cliente para cada um dos analistas das empresas mencionadas anteriormente.

3.2.3 Requisitos do projeto

Os requisitos do produto foram definidos a partir de um ou mais requisitos do cliente, ou seja, cada requisito do cliente se transforma em pelo menos um requisito do produto. Assim como um requisito do produto podem ser relacionados com mais de um requisito do cliente.

Definidos os requisitos dos clientes e do produto foi feita a matriz de relacionamento entre eles de modo a ordenar os requisitos pelo grau de importância para o desenvolvimento do produto.

Além de relacionar e ordenar os requisitos do cliente com os requisitos do produto realizou-se a correlação entre os próprios requisitos do produto entre si, desse modo, foi possível verificar se os requisitos de produtos para diferentes demandas do cliente são positiva ou negativamente correlacionados.

Definidos os respectivos pesos para cada requisito do produto em detrimento ao grau de importância evidenciado pelo cliente, ordenou-se os requisitos do produto em que deve-se priorizar na etapa do projeto preliminar.

3.3 PROJETO PRELIMINAR

Para construção de um projeto preliminar, analisou-se possíveis formas de implementação do circuito eletrônico de detecção de vazamento de ar, formas de interface gráfica para visualização da detecção bem como possíveis enclausuramentos. Optou-se inicialmente pela implementação do circuito utilizando uma placa de matriz de contato (protoboard) e componentes eletrônicos discretos pela possibilidade de ajustes e alterações não destrutivas em relação a uma placa de circuito impresso, por exemplo. Para leitura e controle do sistema, optou-se pelo uso do kit de desenvolvimento Arduino, que possui vasta documentação com bibliotecas Open-Source e ampla comunidade de suporte e baixo custo em comparação a outros kits de desenvolvimento e microcontroladores comerciais juntamente com o uso da aplicação Node-Red também sendo uma aplicação de amplo uso pela comunidade de desenvolvimento e livre (sem custos) para construção de uma interface gráfica para

visualização em tempo real dos resultados de leitura do sistema implementado. Chegou-se à conclusão de que o melhor meio de fazer o enclausuramento quando for feito um protótipo seria via manufatura aditiva, pelo custo, tempo e facilidade de implementação.

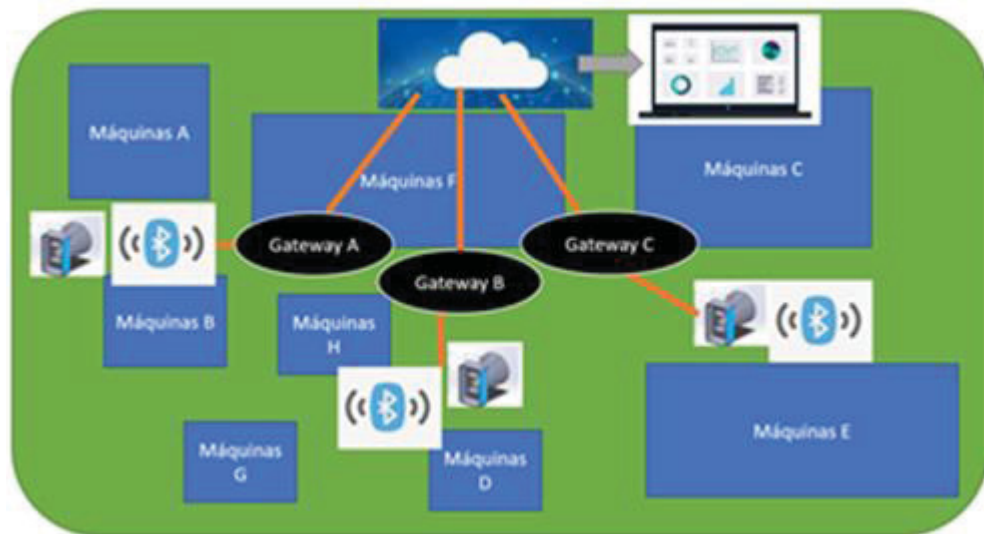
Foi definido trabalhar inicialmente com apenas um sensor para que se pudesse testar, tratar os dados e analisar de forma consistente. Verificou-se que se obtêm resultados mais apurados e precisos com o uso de dezenas de sensores, em busca de uma melhor performance com apenas um microfone, apostou-se no conceito cônico da área de captação do ruído, com o objetivo de ter as ondas geradas direcionadas ao sensor.

3.3.1 Arquitetura da solução

Avaliando o ambiente de aplicação industrial montou-se um layout padrão de pequena / média empresa de uma linha de produção genérica. A proposta de solução deve ter uma interface sem fio com a rede industrial preparada para os principais protocolos de comunicação para interação em nuvem e verificação de possíveis vazamentos na planta.

Além da conectividade, o protótipo deve apresentar nível de proteção compatível para aplicações tipicamente industriais, dentre elas, o grau de proteção IP. Avaliando os equipamentos atualmente fornecidos para detecção de vazamento, atribuímos o grau de proteção IP42 como mínimo.

A implementação da solução na planta demanda um estudo prévio da instalação industrial, de modo a distribuir os equipamentos de detecção em pontos estratégicos - regiões de derivação da linha de ar e com elevada concentração de dutos de ar comprimido.

Figura 14 - Arquitetura de solução

Fonte: Autores

3.3.2 Matriz SWOT

A matriz SWOT (ou FOFA) foi elaborada de modo a alinhar os pontos fortes e fracos da proposta-solução e direcionamento de um MVP adequado para a nossa persona / cliente-alvo.

Figura 15 - Matriz SWOT da proposta de produto/negócio



Fonte: Autores

3.4 PROJETO DETALHADO

Foram feitos desenhos mecânicos de algumas possibilidades de abrigo para os componentes necessários para detecção de vazamento. Foi utilizado o Software Solidworks versão 2020 para gerar o desenho em 3D, na sequência foi salvo em arquivo STL para que posteriormente pudesse ser fatiado em um software de fatiamento e então finalmente pudesse ser impresso em 3D.

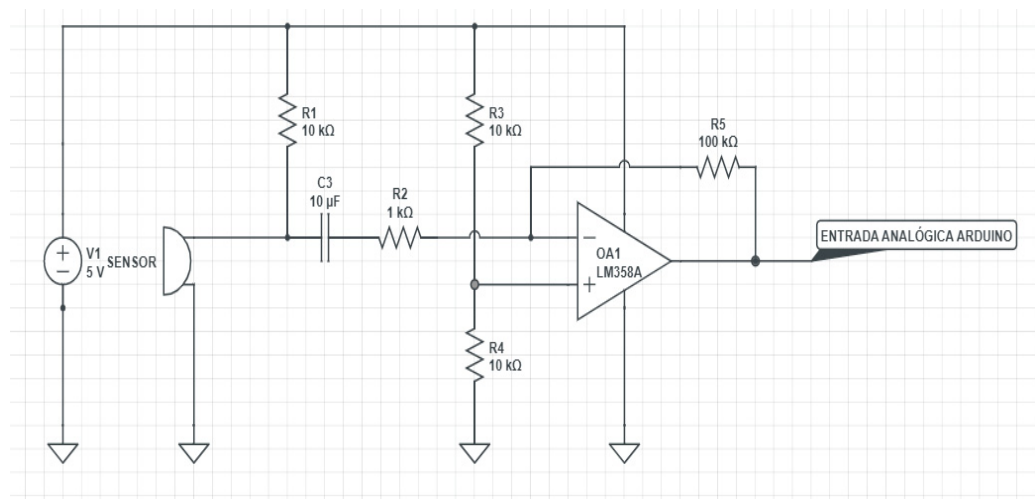
Outro desenho elaborado de forma simplificada é mostrado na **Figura 16**, foi necessário para auxiliar na listagem de materiais necessários para o experimento que será melhor detalhado na seção de resultados.

Figura 16 - Circuito amplificador de sinal

Fonte: Autores

Uma vez que o sensor ultrassônico possui alta sensibilidade e uma possível detecção de sinal poderia não ser percebida pela entrada analógica do Arduino se ligado diretamente à mesma, projetou-se e implementou-se um circuito amplificador de sinal com um ganho de 10 vezes. Dessa forma, uma variação do sinal elétrico como resposta do sensor a uma perturbação ultrassônica é amplificada 10 vezes, aumentando a faixa perceptível pelo microcontrolador.

A **Figura 17** ilustra o circuito amplificador projetado. Com a leitura do sinal em uma das entradas analógicas do Arduino, realizou-se a programação de maneira simples de forma “entrada e saída”, ou seja, para que em caso de detecção de um sinal ultrassônico ocorra a indicação na interface gráfica.

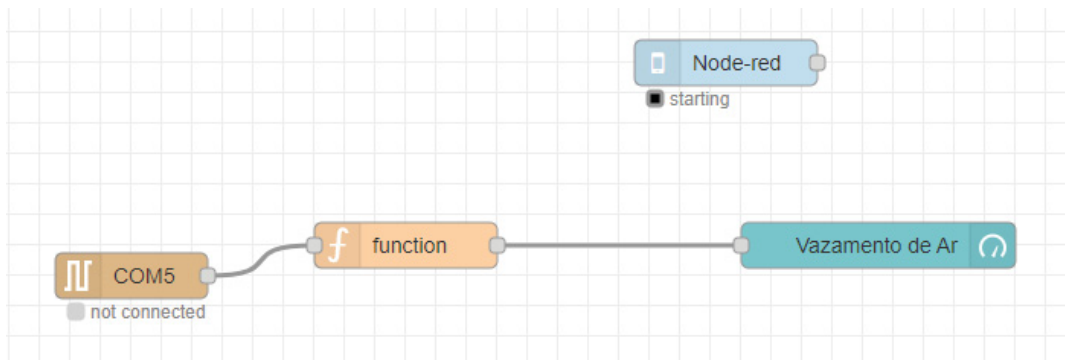
Figura 17 - Circuito amplificador de sinal

Fonte: Autoria própria

O esquema projetado para a interface gráfica via software Node-Red. Como protótipo, a comunicação entre o Arduino e a interface gráfica foi realizada com o mesmo conectado a uma porta serial (USB). Dessa forma, utilizando o navegador web

é possível acessar a interface e visualizar os resultados. A **Figura 17** apresenta o diagrama criado via software Node-Red para geração da interface gráfica (Dashboard). A **Figura 19** apresenta a interface final, criada em forma de gráfico, com escala conforme a resolução da entrada analógica do Arduino (0-1023).

Figura 18 - Esquema criado para interface gráfica



Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Interface gráfica (dashboard) para indicação de detecção de vazamento



Fonte: Autoria própria

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de verificar a sensibilidade e capacidade de detecção do sensor de baixo custo selecionado elaborou-se um *DoE - Design of Experiment* para testar as principais hipóteses e fatores que poderiam ser falsos-positivos.

Utilizou-se um sensor calibrado - microfone Deltraton até 50Hz - para captura do espectro produzido pelo vazamento e confirmação das informações da literatura de frequência espectral predominante de vazamento de ar comprimido, e melhor entendimento das influências do ruído ambiente para a detecção.

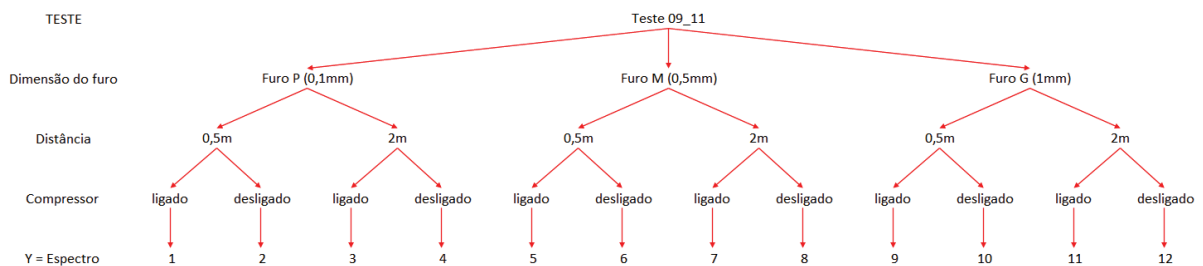
O teste foi realizado no Laboratório de Acústico do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR com o auxílio de um compressor de ar de uso odontológico (isento de óleo) conectado a mangueiras de ar comprimido e conexões de engate rápido, equipamentos típicos do ambiente industrial.

A principal hipótese de influência do sinal era que o ruído do compressor e/ou de outro equipamento de uso industrial influenciasse na percepção do sensor de baixo custo.

Outra hipótese que foi avaliada foi o fator dimensão do furo de vazamento da linha, assim como, a distância entre o ponto de vazamento e o sensor para percepção do ruído com assinatura espectral característica de vazamento de ar.

Na **Figura 20** segue a árvore de teste completa realizada no laboratório com o sensor de baixo custo e o sensor Deltraton realizado no laboratório de acústica.

Figura 20 - Árvore de testes em laboratório



Fonte: Autores

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção será exposto, inicialmente, os requisitos primordiais para uma solução minimamente viável a partir da visão de profissionais de empresas de diferentes setores da indústria as quais têm interesse em aplicações da Indústria 4.0. Por conseguinte, será exposto o resultado dos testes experimentais realizados em laboratório para avaliação da versão beta do equipamento.

4.1 REQUISITOS DA PROPOSTA - SOLUÇÃO

Com base na expertise dos profissionais entrevistados para realização deste estudo de proposta de solução foram elencados 9 requisitos necessários para uma solução robusta para o ambiente industrial 4.0.

Na tabela 1 estão elencados os requisitos na percepção do cliente para uma aplicação de equipamento de manutenção em ambiente industrial com foco em gestão de ativos.

Tabela 1 - Principais necessidades/requisitos da indústria para a proposta solução

item	Necessidade do cliente
1	<i>Confiabilidade de detecção no vazamento de linhas de ar</i>
2	<i>Baixo custo - payback menor que 1 ano</i>
3	<i>Alcance de detecção com raio de 10m</i>
4	<i>Conectividade com rede industrial - fácil integração e flexível</i>
5	<i>Tamanho e formato compacto</i>
6	<i>Instalação facilitada e rápida</i>
7	<i>Durabilidade de +2 anos</i>
8	<i>Sistema autônomo (sem necessidade de intervenção humana)</i>
9	<i>Aplicação em ambiente industrial</i>

Os requisitos do cliente foram avaliados pela equipe e transformados nos requisitos mínimos do produto conforme segue na tabela 2. Salienta-se que há mais requisitos do produto se comparado com os requisitos do cliente, pois um requisito do cliente pode ser desmembrado em 2 ou mais requisitos do produto.

Tabela 2 - Requisitos do produto

Item	Requisitos do produto
1	<i>Sensor com alcance de 10m</i>
2	<i>Sensor com faixa de frequência até 40kHz</i>
3	<i>Conectividade sem fio - alcance</i>
4	<i>Grau de proteção - IP4X</i>

- 5* *Sistema especialista para detecção de vazamento (pós processamento)*
- 6 *Uso de componentes comerciais (fornecedor chinês)*
- 7 *Sensoriamento e monitoramento on-line (servidor)*
- 8 *Volume máximo de 4000 cm³*
- 9 *Fixação simplificada*
- 10 *Setup plug and play (ligar e conectar)*
- 11 *Comunicar com nuvem poucas vezes ao dia (pode ser programável)*

Utilizando a Matriz QFD foi possível hierarquizar os requisitos do produto em ordem de importância e percepção de valor pelo cliente. Dessa forma, restringiu-se em focar nos 5 principais requisitos para uma proposta de solução beta (ou MVP).

Os principais requisitos em ordem de importância foram:

Tabela 3 - Principais requisitos do projeto

Ordem	Requisito	Pontuação
1	<i>Conectividade sem fio</i>	482
2	<i>Sistema especialista para detecção de vazamento (pós-processamento)</i>	428
3	<i>Grau de proteção IP42</i>	424
4	<i>Sensoriamento e monitoramento on-line (servidor)</i>	377
5	<i>Setup Plug and play</i>	352

Obs.: (1) pontuação total: 3526 e 11 requisitos

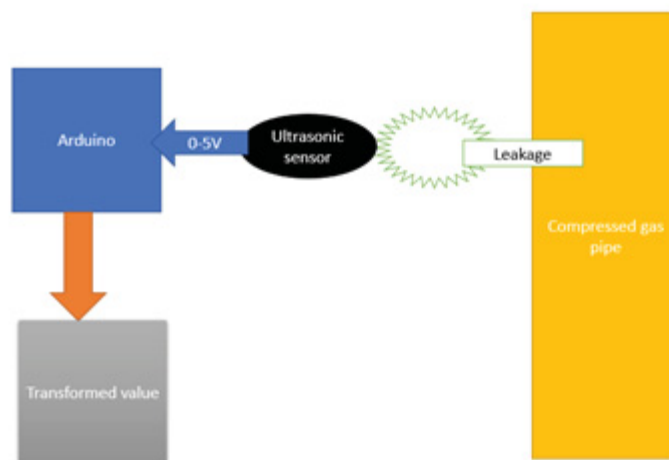
A matriz de correlação demonstrou que dentre os 5 principais requisitos do cliente há uma correlação forte negativa entre os requisitos de conectividade sem fio e grau de proteção. Devido a hierarquização dos requisitos a conectividade será priorizada ao grau de proteção.

A partir do conhecimento dos requisitos de projeto, público-alvo elaborou-se o conceito ilustrado na **Figura 14**, onde arquitetura da solução proposta é detalhada, a qual consiste em um detector de vazamentos de ar comprimido de baixo custo para aplicações industriais de pequeno porte, utilizando tecnologias, as quais tem sido fomentada na indústria no contexto 4.0.

4.2 MEDIÇÕES DE ESPECTRO

Com o intuito de validar o conceito de detecção de vazamento por meio de priorização de frequências ultrassônicas, foram planejados testes em laboratório. Utilizando recursos disponíveis no laboratório do departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná.

Figura 21 - Esquemático do setup de testes em laboratório



Fonte: Autoria própria

Para a realização dos testes foram utilizados equipamentos disponibilizados pela UFPR, em um de seus laboratórios, os quais serão descritos a seguir.

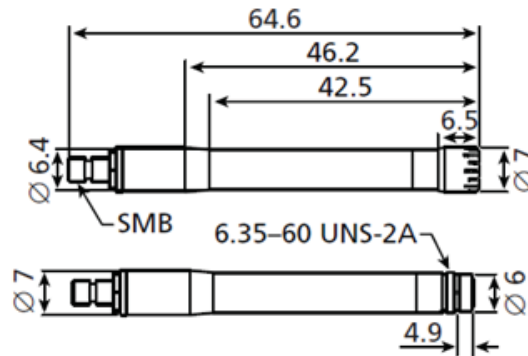
O Microfone utilizado foi um microfone de campo com CCLD Deltatron pre amplificador, tipo 4944 A, com faixa de resposta entre 16 Hz a 70 kHz.

Logo no início da bateria de ensaios, foi realizada a calibração do equipamento por meio do dispositivo acessório ao kit da solução LMS, com as seguintes características para sua calibração : 29 mv/Pa Calibração / 94 dB / Frequência 1khz.

Figura 22 - Equipamentos utilizados nas medições



Figura 23 - Características físicas do microfone Deltatron



Fonte: Site Deltatron

Figura 24 - Equipamento compressor de ar



Fonte: Autores

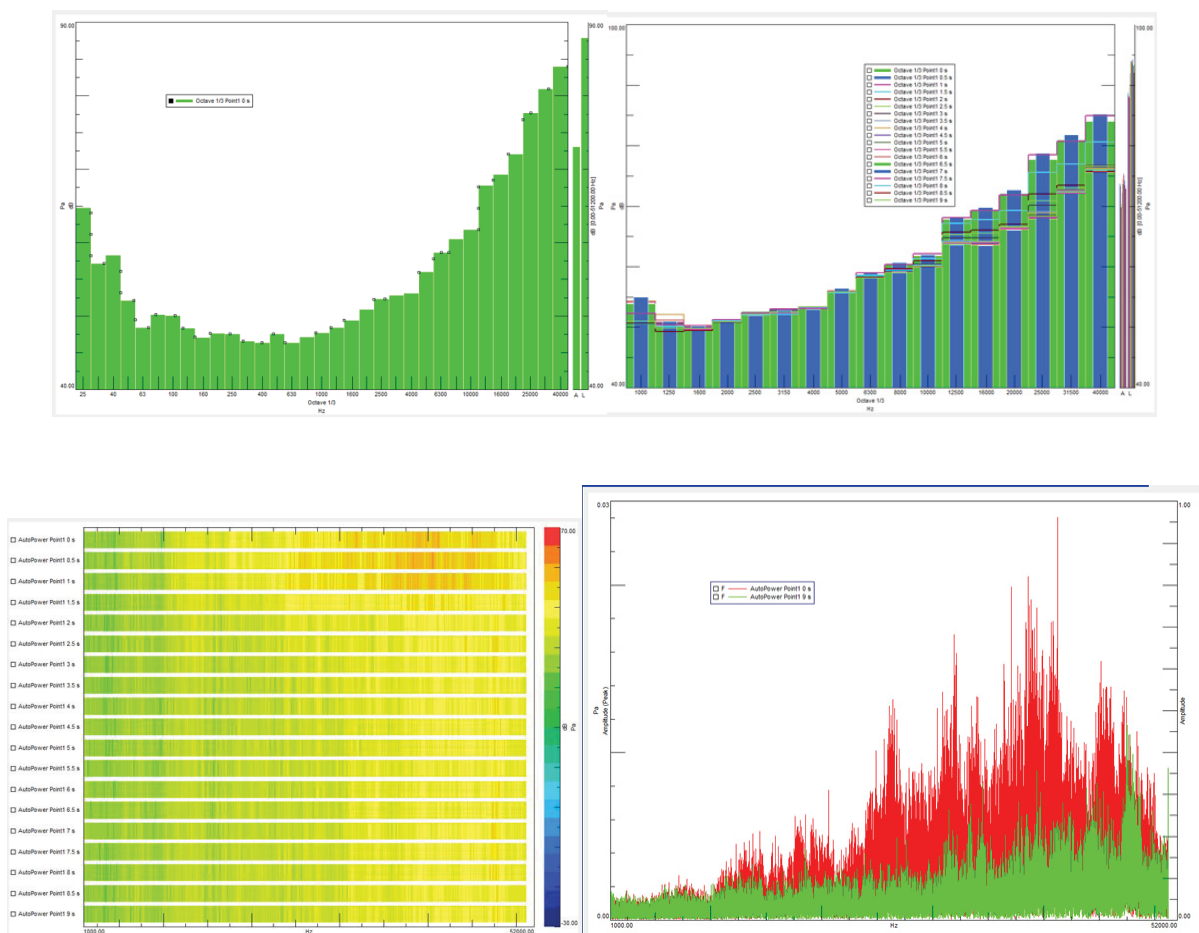
Compressor de Ar Odontológico 1,0 hp 30 Litros Isento de Óleo csd schulz, dados TÉCNICOS: Deslocamento teórico (pcm): 5 / Deslocamento teórico (l/m): 141 / Nº de Pólos: 4 / Potência do motor (hp): 1 / Potência do motor (kW): 0,75 / Pressão de Operação Máxima (bar): 8,3 / Pressão de Operação Máxima (lbf/pol²): 120 / Pressão de Operação Mínima (bar): 5,5 / Pressão de Operação Mínima (lbf/pol²): 80 / Unidade Compressora - Nº de Estágios: 1 / Unidade Compressora - Nº de Pistões: 2 / Volume do Reservatório de Ar (l): 29 / Marca: Schulz / Dimensões do Produto LxAxP (mm): 500 x 640 x 460

As medições foram feitas com auxílio do Software Simcenter Testlab, onde foi feita a aquisição de dados para os cenários mencionados acima, bem como o

tratamento dos dados e posteriormente a geração de gráficos de visualização dos ruídos em cada uma das condições criadas em laboratório.

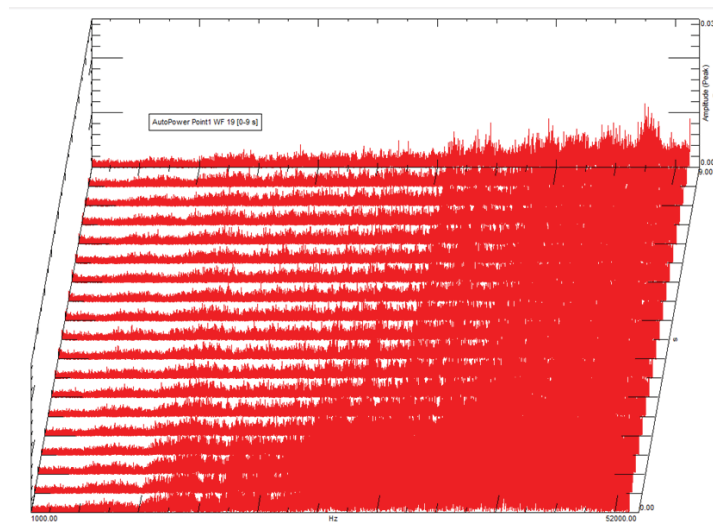
Começando a medição A, foi realizado um furo de aproximadamente 1mm na mangueira, e este furo mantido a distância de 50 cm do sensor, onde percebeu-se que as os maiores picos apresentados foram com frequência próxima de 40 kHz.

Figura 25 – Espectro e análise do sinal de vazamento com furo de 1mm a 0,5m de distância do sensor



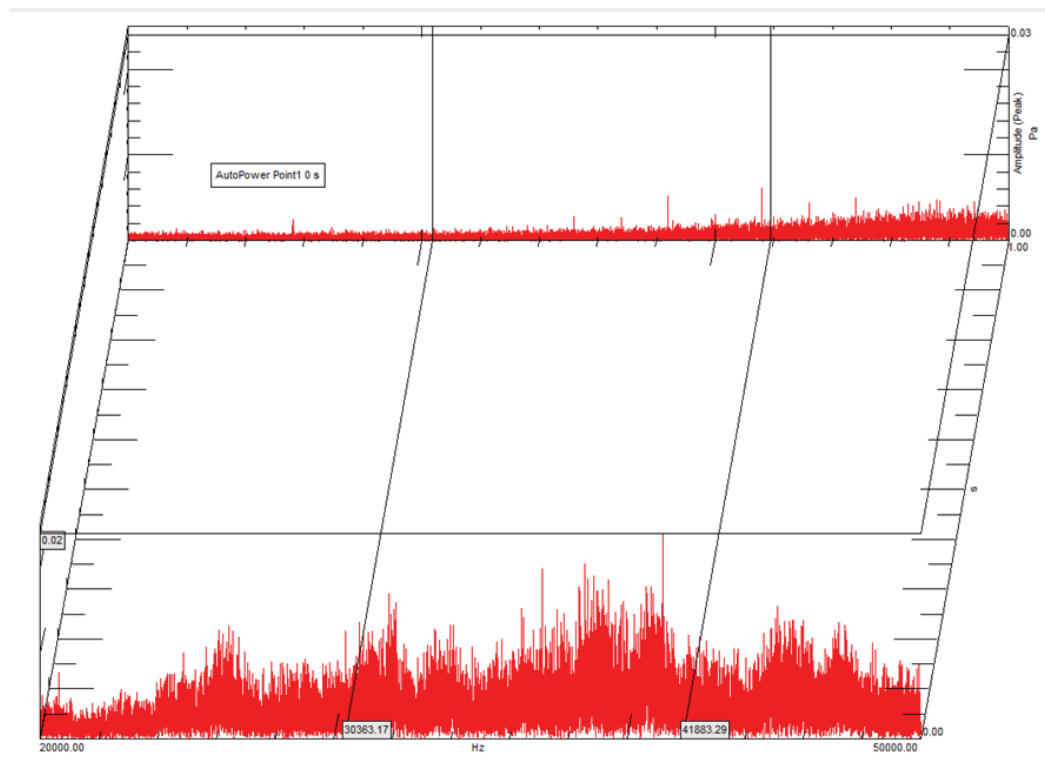
O Software da Siemens permite analisar os dados de distintas formas, em todas elas percebeu-se a acentuação da intensidade do ruído em frequências ultrassônicas.

Figura 26 - Medição A - furo de 1mm a 0,5m de distância do sensor;



Também foram feitos ensaios para comparação do ruído de fundo com o ruído gerado pelo vazamento de ar comprimido. Notou-se que o ruído de fundo tem uma curva linearizada de aumento de intensidade com o aumento da frequência, nos gráficos a seguir pode-se perceber notória diferença entre essas curvas.

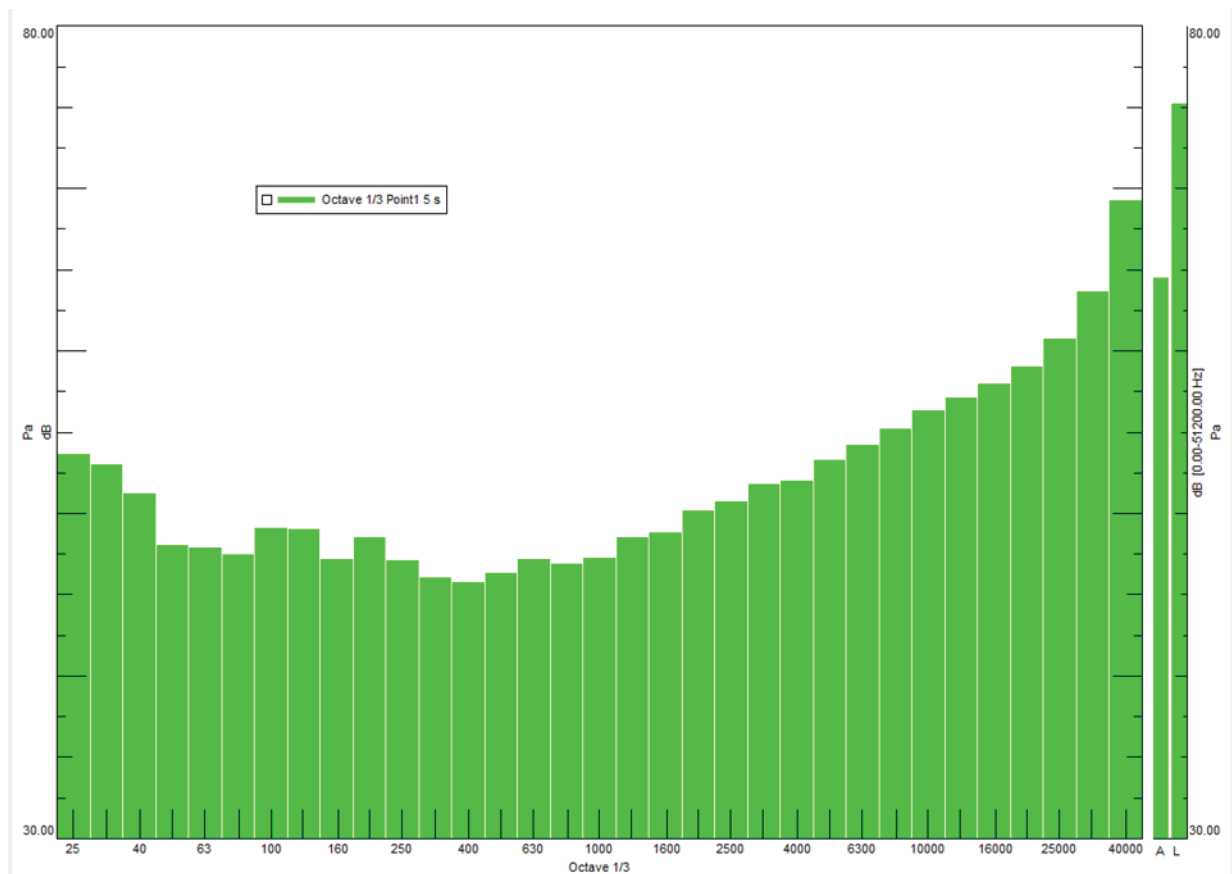
Figura 27 - Comparativo entre ruído de fundo e medição A



Dando sequência ao plano de testes, foram feitas medições com um furo menor, de diâmetro aproximado em 0,5 mm, mantendo o jato de ar a mesma distância do primeiro experimento.

Medição B1- furo com diâmetro de 0,5mm a 0,5m, apesar da intensidade ser menor, ainda pode-se observar predominância de picos a frequências próximas a 40 kHz.

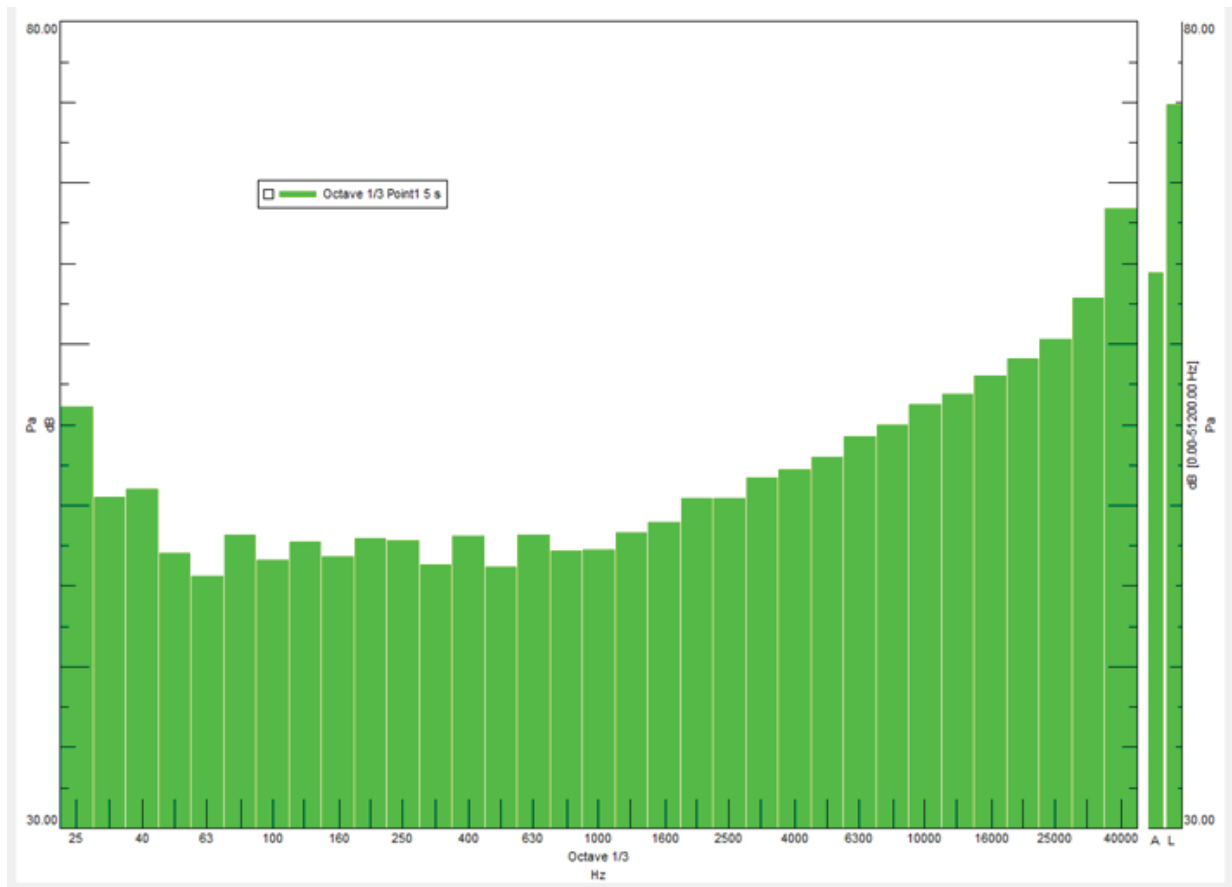
Figura 28 - Medição B1- furo 0,5mm 0,5m



No contexto de verificar a influência do diâmetro do furo de vazamento, foi feito o experimento com diâmetro aproximado de 0,1 mm, o qual não se conseguia ouvir o ruído mesmo por quem estava mais perto do jato.

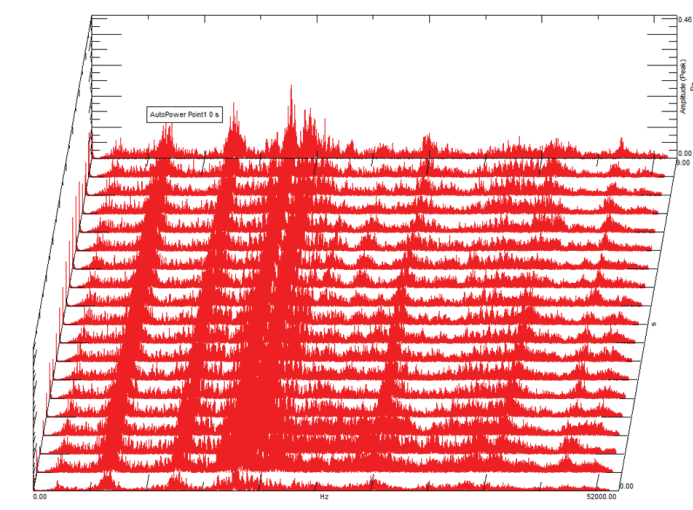
Obteve-se como resultado, picos em frequências ao redor de 40 kHz, o que comprova o que a literatura pesquisada diz sobre utilizar frequências nessa faixa para detecção de vazamento de ar comprimido.

Figura 29 - Medição C1- furo 0,1mm 0,5m



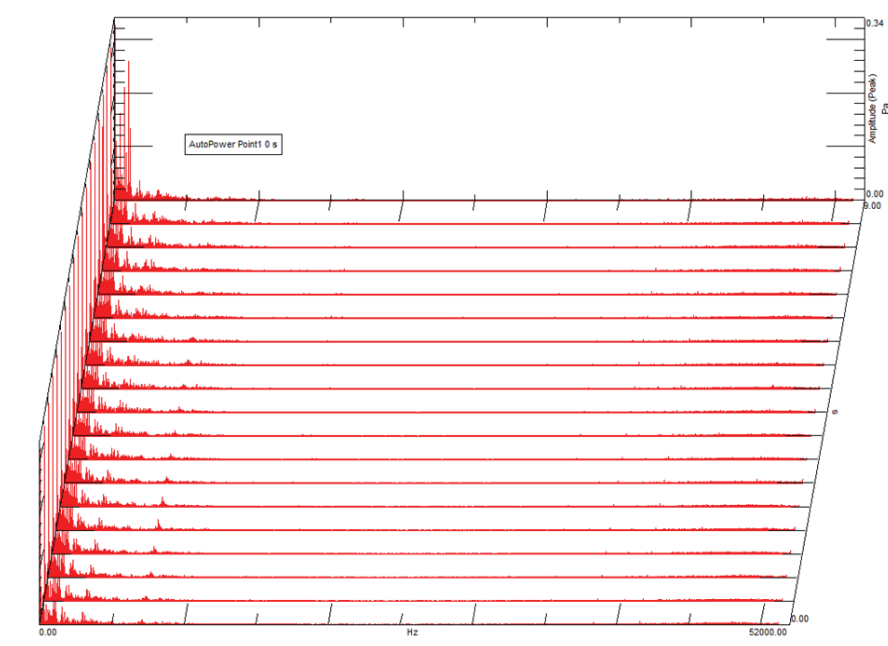
Foi feita uma medição com a bitola da válvula, que é similar a bitola da mangueira, aproximadamente 10 mm de diâmetro, o qual apresenta um ruído altíssimo para o ouvido humano. Este cenário apresentou diversos picos ao longo de toda a banda de frequências, sendo o maior pico a frequência audível.

Figura 30 - Medição C22 - vazamento com válvula aberta

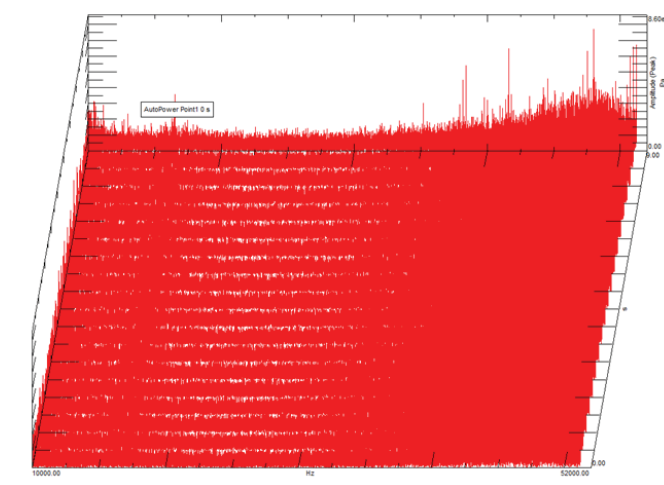


Foi realizado experimentos com o compressor ligado, para que se pudesse ter referência de equipamentos industriais. Notou-se um perfil de ruído bastante linear e com baixas intensidades, portanto facilmente distinguível de um perfil de ruído de ar comprimido.

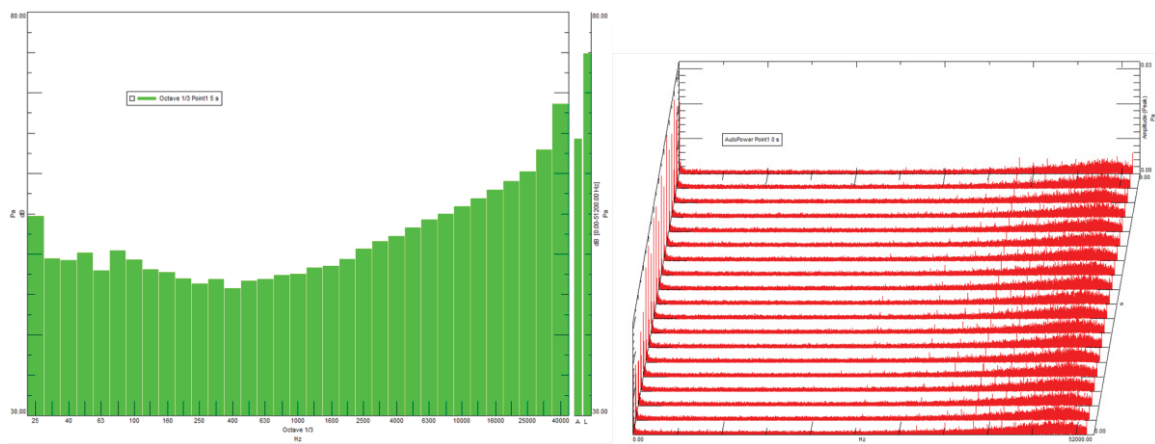
Figura 31 - Medição D11 - compressor ligado



No cenário a seguir foi feita a medição com o compressor ligado e um furo de 0,1 mm, onde foi necessário filtrar a faixa de frequência entre 10 kHz a 50 kHz para poder visualizar o ruído do vazamento de ar comprimido.

Figura 32 - Compressor ligado + furo 0,1mm 0,5m

Foi avaliada a influência da distância do vazamento até o sensor, deixando o furo a 2 m de distância do sensor, com um furo de aproximadamente 0,1 mm de diâmetro, onde pode-se perceber uma curva mais suave, com picos de baixa intensidade, mas ainda assim identificados em frequências ultrassônicas.

Figura 33 - F1- furo 0,1mm a 2m

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO - MVP

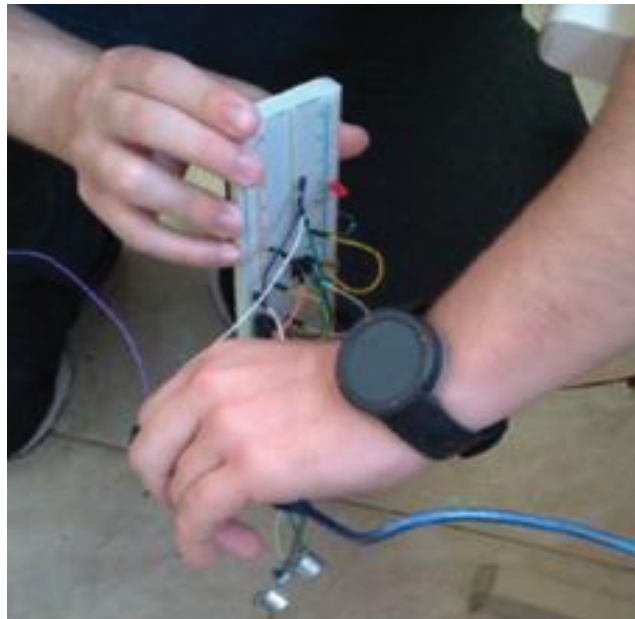
A partir do protótipo construído utilizando-se de um sensor ultrassônico com detecção de faixas de frequência próximas à 40kHz, do kit de desenvolvimento Arduino conectado a porta USB de um computador para apresentação em uma

interface gráfica e de um circuito amplificador de sinais implementado em uma matriz de contato testes foram realizados nas dependências do laboratório do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Os testes foram realizados com uma tubulação pneumática em um circuito fechado, ou seja, sem saída de ar, a partir de um compressor odontológico possuindo apenas um furo realizado propositalmente com uso de um prego (espessura de 2mm) para a ocorrência de vazamentos de ar.

Os resultados dos testes realizados pelo protótipo implementado foram satisfatórios quanto à detecção do vazamento pelo furo implementado. Sem relacionar a magnitude do vazamento (com a interface gráfica apresentado uma escala de 0 à 1023, de acordo com a escala da entrada analógica do kit Arduino), e com o ambiente controlado quanto a ruídos, houve a indicação do vazamento via Dashboard mostrando que o sensor utilizado em sua faixa de frequência especificada foi capaz de reconhecer um vazamento de ar. A **Figura 35** ilustra a tela da interface gráfica quando houve a indicação de que um ruído ultrassônico foi detectado, no caso, oriundo do vazamento de ar.

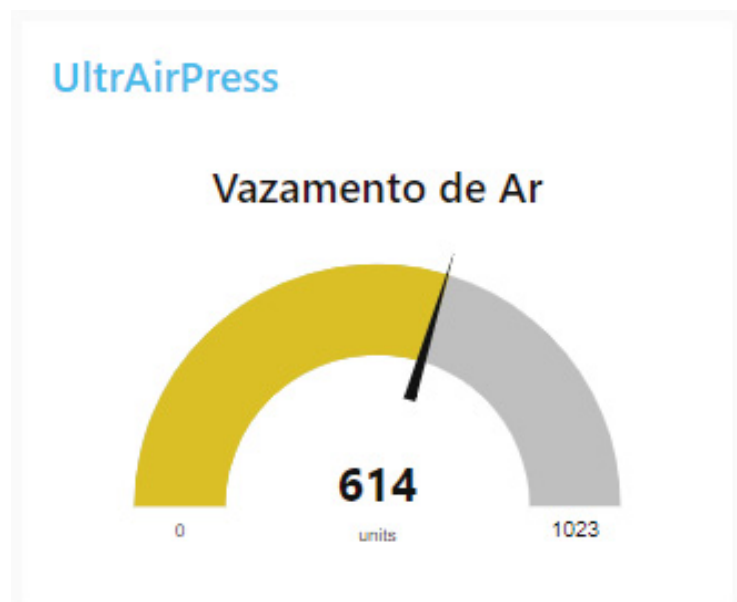
Foram elaborados também dois modelos de invólucros para abrigar os componentes do circuito eletrônico que inclui o sensor ultrassônico. Considerando o contexto industrial onde será instalado, será necessário atender ao índice de proteção IP42. Foram modelados alguns cases que estavam sendo planejados para impressão 3D que acomodariam o MVP, porém o MVP acabou ficando com dimensões e fiações que tornaram inviável a aplicação de um case, bem como não sendo um impeditivo para continuidade do projeto, decidiu-se trabalhar com uma protoboard ao invés de um case para os componentes. A **Figura 36** ilustra os modelos de cases projetados.

Figura 34 - Testes realizados com protótipo implementado em matriz de contatos



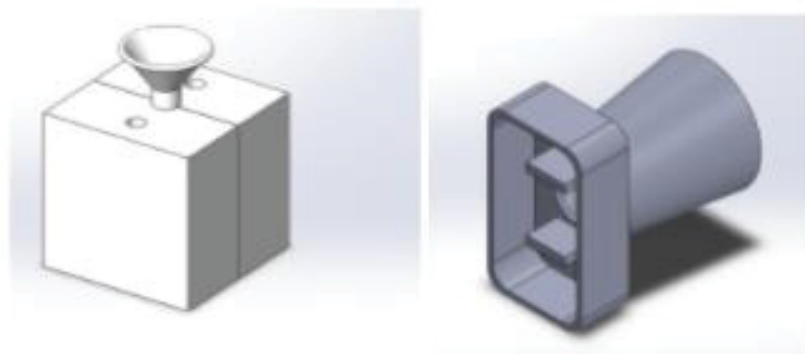
Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Tela da interface gráfica desenvolvida indicando a presença de um sinal ultrassônico oriundo do vazamento de ar



Fonte: Autoria própria

Figura 36 - Modelos 3d de case projetados para possível enclausuramento do protótipo



Fonte: Autoria própria

5.CONCLUSÕES

Ao decorrer deste trabalho ficou evidente que o tema é muito relevante, seja no aspecto de redução de custos de operações ou visando contribuir com o planeta com a redução do uso de eletricidade de operações, reduzindo assim o impacto ambiental das indústrias que utilizam ar comprimido.

Foi possível perceber que apesar de existirem tecnologias para detecção de ar comprimido, muitas empresas ainda não conseguem justificar o investimento em equipamentos para eliminar ou ao menos reduzir drasticamente o desperdício de ar comprimido muito presente em fábricas.

O uso de equipamentos para detecção de vazamentos permitem reduções consideráveis no consumo de ar comprimido em uma indústria, nesse estudo identificou-se uma oportunidade de aproveitar-se de tecnologias estudadas ao longo do curso, para que não somente sejam detectados vazamentos pontuais, mas que se possa estabelecer um processo de manutenção de alta eficiência energética, onde o período entre o surgimento de um vazamento e a detecção seja muito curto, dependendo de iniciativas e programação manuais de times que tem normalmente uma série de outras prioridades dentro das grandes corporações.

Foi possível identificar e conhecer o comportamento do espectro do ar comprimido em situações bastante comuns em redes de ar comprimidos industriais, como furos de 1 mm em mangueiras de 8 mm, sendo assim esse trabalho pode servir

de base para futuros trabalhos que venham a buscar evolução do tema, aplicando o conceito para desenvolvimento da parte de interpretação dos dados.

Esse trabalho contribui também na compilação de uma série de equipamentos disponíveis no mercado que podem ser aplicados de imediato às empresas que sofrem com a dor do vazamento de ar comprimido, os quais requerem disciplina e um planejamento robusto, tanto das medições quanto do plano de ação de correções. A ideia inicial do grupo era oferecer um pacote completo, tendo desenvolvida a solução completa, entende-se que o melhor modelo a ser trabalhado é oferecer um pacote de detecção e solução dos vazamentos, pois os vazamentos não podem esperar que a empresa consiga priorizar as correções em meio a todas as atividades que normalmente estão em andamento do time de manutenção.

Concluiu-se também que é possível desenvolver um detector de baixo custo o qual possibilita um investimento menor por parte de quem for bancar os ativos da solução e com o objetivo de reduzir a barreira de entrada dessa solução nas indústrias, acredita-se que o melhor modelo é de oferecer o serviço de detecção garantida, com o monitoramento contínuo da rede e enviando uma equipe para resolver o vazamento, aplicando melhoria contínua, buscando as melhores práticas para reduzir riscos de novos vazamentos.

Notou-se que os usuários, sejam operadores, líderes ou até mesmo mantenedores, tem papel importantíssimo na manutenção de baixos níveis de vazamento e desperdício, sendo assim é importante incluir no pacote treinamentos e campanhas de conscientização, pois existem os vazamentos ocasionais e outros vazamentos que ocorrem por falta de consciência de quanto custa um vazamento para a empresa e para o planeta, e mesmo com o monitoramento contínuo, um vazamento gera custos, e muitas vezes esses custos podem ser evitados apenas com bom senso e conhecimento de formas adequadas de realizar processos como o de limpeza de peças com mangueiras ao invés de ter bicos adequados que controlam a vazão de ar comprimido, ou improvisando em montagens de sistemas de ar comprimido onde as conexões não são adequadamente adaptadas causando vazamentos contínuos.

Sugestões de trabalhos futuro

Durante a análise e discussão dos resultados surgiram alguns questionamentos que não puderam ser confirmados neste trabalho, mas que serviram para apontar sugestões para a continuidade dos estudos. Essas sugestões são listadas na sequência:

- Analisar o efeito das distâncias das medições realizadas pelo protótipo no resultado final bem como sua quantização para indicar a magnitude do vazamento;
- Aplicar o protótipo implementado em plantas industriais e verificar os efeitos sofridos pelo sistema com os ruídos de fábrica oriundos de máquinas e equipamentos;
- Implementar melhorias no protótipo como a adição de mais sensores ultrassônicos operando em conjunto e alterações de software visando filtrar a influência de demais ruídos ultrassônicos no sistema desenvolvido;

6.REFERÊNCIAS

AIRES, M. O.; ROSA, A. C. M, **INDÚSTRIA 4.0: A MANUFATURA ADITIVA COMO FERRAMENTA DE INOVAÇÃO E OTIMIZAÇÃO**. X FATECLOG, LOGÍSTICA 4.0 & A SOCIEDADE DO CONHECIMENTO, PAGINAS 1 -10, 2019.

BARROS, G. X. S **MODELAGEM DIGITAL TRIDIMENSIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA:UM ENFOQUE SOBRE A MODELAGEM ORGÂNICA**. 2012. 176 Páginas. Tese de mestrado acadêmico - Universidade Federal de Pernambuco.

COMO AS FÁBRICAS PODEM ACELERAR A INSPEÇÃO COM IMAGENS ACÚSTICAS. Disponível em: <<https://www.flir.com.br/discover/industrial/how-manufacturing-facilities-speed-up-inspection-with-acoustic-imaging/>>. Acesso em: 18/01/2022

FERREIRA, N. A. R. **O Uso da Técnica Ultrassônica na Eficiência Energética de Sistemas de Ar Comprimido**. 2020. 102 páginas. Dissertação de Mestrado Acadêmico - Universidade Federal de São João Del Rei.

KAWAMURA, D. K. C. **Estudo Exploratório em NODEJS e NODE-RED para INTERNET OF THINGS** . 2017. 56 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso - Fundação Educacional do Município de Assis, Campus José Santili Sobrinho.

Air leak and Partial Discharge Detection Frequencies: What you need to know. Disponível em: <<https://nlacoustics.com/air-leak-and-partial-discharge-detection-frequencies-what-you-need-to-know/>>. Acesso em: 22/01/2022

PARKER HANNIFIN IND. COM. LTDA. **Tecnologia Eletropneumática Industrial**. Jacaré - São Paulo, 2005. 152 páginas.

O que é o Arduino, para que serve e primeiros passos[2022] Disponível em : <<https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/>>. Acesso em: 22/01/2022

O que é o Node-Red? Conhecendo e Instalando. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/outros/o-que-e-node-red-conhecendo-e-instalando>>. Acesso em: 22/01/2022

Os 5 principais motivos para usar o Node-Red agora. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/software/163254-5-principais-motivos-usar-node-red.htm>>. Acesso em: 22/01/2022

SOMETHING IN THE AIR: ULTRASOUND FOR COMPRESSED-AIR LEAK DETECTION. Disponível em: <<https://www.plantservices.com/articles/2018/something-in-the-air-ultrasound-for-compressed-air-leak-detection/>>

Transducers \acoustic transducers \measurement microphones \microphone set \type **4944-a**. Disponível em:

<<https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-set/4944-a>>

WENDLING, M. **Amplificadores Operacionais**. Versão 2.0. 2010. 44 páginas. Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá "Professor Carlos Augusto Patrício Amorim".

