

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS - CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E  
ELETRÔNICA CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA

Vanderson Xavier

Desenvolvimento de testes automatizados para as entradas  
analógicas do equipamento eletrônico VibraOne: estudo sobre  
métodos, conceitos e aplicações

FLORIANÓPOLIS  
2024

VANDERSON XAVIER

Desenvolvimento de Testes Analógicos Automatizados para o  
Equipamento Eletrônico VibraOne: Um Estudo sobre Métodos,  
Conceitos e Aplicações

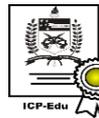
**Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Eduardo Luiz Ortiz Batista, Dr.**

Florianópolis, fevereiro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

VANDERSON XAVIER

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.



Documento assinado digitalmente

**Miguel Moreto**

Data: 27/02/2024 09:46:09-0300

CPF: \*\*\*.850.100-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenador do curso de graduação em  
Engenharia Elétrica



Documento assinado digitalmente

**Eduardo Luiz Ortiz Batista**

Data: 27/02/2024 09:40:08-0300

CPF: \*\*\*.521.889-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Orientador(a): Prof. Eduardo Luiz Ortiz  
Batista, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

**Richard Demo Souza**

Data: 27/02/2024 09:02:45-0300

CPF: \*\*\*.267.379-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Richard Demo Souza, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

**Walter Pereira Carpes Junior**

Data: 27/02/2024 13:06:43-0300

CPF: \*\*\*.566.599-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 20 de fevereiro de 2024



# Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão às pessoas e instituições que tornaram possível a conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Primeiramente, à minha família, especialmente aos meus pais, que me proporcionaram a oportunidade de cursar esta graduação em uma universidade federal. Agradeço também aos meus avós, que sempre me incentivaram a perseguir os estudos em engenharia. Que Deus os tenham.

Aos amigos que fiz durante a faculdade e que levo comigo para o resto da vida, compartilhamos momentos únicos juntos.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, o professor Eduardo Batista, pela orientação e suporte ao longo deste processo. À equipe docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, meu profundo agradecimento. O aprendizado que adquiri sob a orientação de professores dedicados e nas instalações da universidade contribuiu significativamente para minha formação acadêmica.

Agradeço também à empresa AQTech e aos colegas de trabalho por proporcionarem a oportunidade de desenvolver o projeto para a conclusão do curso.

Finalmente, a todas as outras pessoas especiais que contribuíram de alguma forma, meu sincero agradecimento por fazerem parte deste marco em minha jornada acadêmica.



# Resumo

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aborda o desenvolvimento de testes automatizados para as entradas analógicas do equipamento eletrônico VibraOne visando otimização de tempo e consistência nos critérios de validação. A pesquisa engloba uma análise detalhada do sistema eletrônico do equipamento, explorando metodologias de teste para equipamentos eletrônicos. O estudo também se aprofunda em tratamentos de sinais, com ênfase na análise de ondas senoidais para determinação da tensão pico a pico, valor médio e valor eficaz. O código desenvolvido visa automatizar o processo de testes, proporcionando ao usuário uma maneira eficiente de identificar possíveis problemas de fabricação do equipamento. Este TCC busca uma contribuição significativa para aprimorar a qualidade e eficiência dos testes em equipamentos eletrônicos analógicos, oferecendo uma abordagem prática aos conceitos acadêmicos.

**Palavras-chave:** VibraOne, Testes, Automatização de processos, Circuitos analógicos, Testes automatizados.



# Abstract

This undergraduate thesis addresses the development of automated tests for the analog inputs of the VibraOne electronic equipment, aiming at time optimization and consistency in validation criteria. The research encompasses a detailed analysis of the electronic system of the equipment, exploring testing methodologies for electronic devices. The study also delves into signal processing, with an emphasis on the analysis of sine waves to determine peak-to-peak voltage, average value, and root-mean-square value. The developed code aims to automate the testing process, providing users with an efficient way to identify potential manufacturing issues with the equipment. This thesis seeks a significant contribution to enhancing the quality and efficiency of tests in analog electronic devices, offering a practical approach to academic concepts.

**Keywords:** VibraOne, Tests, Process Automation, Analog Circuits, Automated Testing.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Dispositivo VibraOne. . . . .	23
Figura 2 – Interface física VibraOne. . . . .	24
Figura 3 – Diagrama simplificado da entrada do dispositivo VibraOne. . . . .	26
Figura 4 – Solução proposta para os testes das entradas analógicas do equipamento VibraOne. . . . .	26
Figura 5 – Esquemático da estrutura física dos testes nas entradas analógicas VibraOne. . . . .	27
Figura 6 – Acoplamento AC e DC de um osciloscópio. . . . .	28
Figura 7 – Estrutura geral Software de testes automatizados Entradas analógicas. . . . .	33
Figura 8 – Software de automatização dos testes entradas analógicas. . . . .	35
Figura 9 – Fluxograma do sistema de calibração do sinal AC e o sinal DC. . . . .	36
Figura 10 – Representação gráfica de atuação do algoritmo para detectar a transição de semiciclo do sinal. . . . .	37



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados referentes ao teste 1 no VibraOne 1. . . . .	39
Tabela 2 – Resultados contendo erros propositais referente ao teste 1 no VibraOne 1. . . . .	40
Tabela 3 – Resultados obtidos na realização dos testes manuais e automáticos. . . . .	41
Tabela 4 – Tabela resultados teste 2 VibraOne 2. . . . .	51



# Lista de abreviaturas e siglas

AC: *Alternating Current* (Corrente alternada).

DC: *Direct Current* (Corrente contínua).

C#: *CSharp*.

IEPE: *Integrated Electronics PiezoElectric* (Eletrônica Integrada Piezo-elétrica).

DIP: *Dual In-line Package*.

ADC: Conversor Analógico Digital.



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemática</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo</b>	<b>20</b>
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>VIBRAONE</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Equipamento VibraOne</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO DE TESTES PARA O EQUIPAMENTO VIBRAONE</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Estrutura dos testes manuais</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Estrutura dos Testes Automatizados</b>	<b>25</b>
<b>3.3</b>	<b>Aplicação dos testes</b>	<b>27</b>
3.3.1	Teste $3 V_{ac}$ , $3 V_{dc}$ em escala de $30 V$	27
3.3.2	Teste $3 V_{ac}$ , $3 V_{dc}$ em escala de $5 V$	28
3.3.3	Teste $6 V_{ac}$ em corrente	29
3.3.4	Teste IEPE	29
<b>3.4</b>	<b>Tratamento dos dados</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Estrutura geral</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Interface usuário</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Sistema de calibração</b>	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Unidade de aquisição dos dados</b>	<b>35</b>
<b>4.5</b>	<b>Unidade de processamento de sinais</b>	<b>36</b>
<b>4.6</b>	<b>Unidade de análise de sinais</b>	<b>37</b>
<b>4.7</b>	<b>Gerador de gráfico e relatório</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Otimização do tempo</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>

<b>ANEXOS</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO A – RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 2: <math>3V_{ac} + 3V_{dc}</math>. REFERENTES AO VIBRAONE 1 . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 2: <math>3V_{ac} + 3V_{dc}</math>. REFERENTES AO VIBRAONE 2 . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO C – RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 3: CORRENTE. REFERENTES AO VIBRAONE 1 . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO D – RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 3: CORRENTE. REFERENTES AO VIBRAONE 2 . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO E – RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 4: IEPE. REFERENTES AOS VIBRAONES 1 E 2 . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO F – RESULTADOS OBTIDOS APLICANDO CONFIGURAÇÕES ERRADAS NO TESTE 2: <math>3V_{ac} + 3V_{dc}</math>. REFERENTES AO VIBRAONE 1 . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO G – RESULTADOS OBTIDOS APLICADO CONFIGURAÇÕES ERRADAS NO TESTE 3: CORRENTE. REFERENTES AO VIBRAONE 1 . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO H – RESULTADOS OBTIDOS APLICADO CONFIGURAÇÕES ERRADAS NO TESTE 4: IEPE. REFERENTES AO VIBRAONE 1 . . . . .</b>	<b>63</b>

# 1 Introdução

Na era da tecnologia, tornou-se indispensável pensar na eficiência dos processos de trabalho. Isso se aplica aos sistemas de validação de qualquer produto real. Tais produtos precisam atender critérios de qualidade. Dependendo do nível de qualidade exigida e da quantidade de produtos, surge a necessidade de automatizar os processos, visando aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos, minimizar erros e otimizar o tempo de validação.

## 1.1 Problemática

O presente trabalho foi desenvolvido na empresa AQTech Power Prognostics. Com a expansão da empresa, o aumento do quadro de funcionários e o crescimento nas vendas dos equipamentos VibraOne, torna-se necessário aprimorar a agilidade nos processos produtivos e em toda a cadeia de produção. Nesse contexto, a automatização de processos se apresenta como uma solução viável para otimizar a entrega dos equipamentos aos clientes, garantindo alta confiabilidade em cada etapa e reduzindo ao mínimo a interferência humana na cadeia produtiva.

No cenário atual, um usuário experiente leva cerca de 8 minutos para realizar a bateria de testes analógicos no equipamento VibraOne. Considerando uma média de 100 placas por lote, o tempo total para os testes analógicos seria de 13 horas e 20 minutos, sem levar em consideração outros testes de validação necessários. Devido à constante expansão da empresa, é previsto que os testes sejam realizados por pessoas menos experientes, o que duplicaria o tempo necessário, totalizando 26 horas e 40 minutos.

Ao implementar um novo sistema de automatização dos testes analógicos para os equipamentos VibraOne, estima-se uma redução pela metade do tempo total consumido. Essa significativa redução de tempo proporcionaria benefícios notáveis para a empresa, como maior produtividade, agilidade na entrega dos equipamentos e aumento da capacidade de atender a uma demanda em constante crescimento.

Com base nos motivos mencionados, surge a necessidade de implementar testes automatizados para o processo de validação do equipamento VibraOne, desenvolvido pela empresa AQTech. A automatização desses testes é uma medida estratégica que visa aprimorar a agilidade nas entregas desses equipamentos aos clientes. A implementação de testes automatizados é uma decisão fundamentada na busca pela excelência operacional e na otimização dos recursos disponíveis. Além disso, ao reduzir o tempo dedicado aos testes, a empresa terá a oportunidade de direcionar seus usuários para atividades de maior

valor agregado.

Portanto, a adoção de testes automatizados no processo de validação para o equipamento VibraOne é uma medida estratégica e essencial para aprimorar a agilidade nos processos produtivos e atender às demandas crescentes da empresa. Essa iniciativa resultará em benefícios significativos, incluindo a entrega mais rápida dos VibraOnes aos clientes e a melhoria contínua da cadeia de produção.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um software que automatize os testes analógicos do dispositivo eletrônico VibraOne, fabricado pela empresa AQTech, visando reduzir o tempo necessário para os testes durante o processo de produção.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo proposto, este estudo se desdobrará em uma série de etapas interligadas:

- **VibraOne:** O primeiro passo consistirá em apresentar o equipamento CMS VibraOne. Inclui uma visão geral do equipamento, suas características e funcionalidades.
- **Análise da Entrada Analógica:** Em seguida, será realizada uma análise detalhada da entrada analógica do dispositivo VibraOne, com o propósito de compreender a variedade de testes necessários. Essa fase é crucial para identificar as especificidades e os requisitos de teste do equipamento.
- **Desenvolvimento do Software:** Posteriormente, um programa será desenvolvido na linguagem de programação C#, utilizando o *framework* .NET. O objetivo principal desse programa é fornecer suporte ao usuário encarregado dos testes, permitindo a execução de testes de forma intuitiva, prática e eficiente. O software será projetado para otimizar o processo de teste.
- **Coleta de Dados e Análise de Resultados:** Finalmente, serão coletados dados com base nos testes realizados. A análise desses dados será realizada para determinar se o equipamento VibraOne atende aos critérios de validação estabelecidos. Esse processo será crucial para concluir o projeto de automatização dos testes analógicos, avaliando sua eficácia e impacto no desempenho do equipamento e publicando os resultados.

## 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

**Capítulo 2 - VibraOne:** Este capítulo apresentará o equipamento VibraOne. Inclui uma visão geral do equipamento, suas características e funcionalidades.

**Capítulo 3 - Desenvolvimento de um Procedimento de Testes para o Equipamento VibraOne:** Neste capítulo, será realizada uma análise detalhada da entrada analógica do dispositivo VibraOne. Além disso, será abordada a estratificação dos quatro tipos de testes que serão conduzidos:

- Teste 1: Gerador de sinais como onda senoidal em  $100\text{ Hz}$ , tensão de  $3V_{ac}$  e  $3V_{dc}$  em escala de  $30\text{ V}$ .
- Teste 2: Gerador de sinais como onda senoidal em  $100\text{ Hz}$ , tensão de  $3V_{ac}$  e  $3V_{dc}$  em escala de  $5\text{ V}$ .
- Teste 3: Gerador de sinais como onda senoidal em  $100\text{ Hz}$ , tensão de  $6V_{ac}$  em Corrente.
- Teste 4: Gerador de sinais desligado.

**Capítulo 4 - Desenvolvimento do software:** Este capítulo detalhará o processo de desenvolvimento do software utilizado para controlar os sinais de entrada, coletar dados, realizar a calibração com o gerador de sinais e multímetro digital, além de calcular os recursos de tensão de pico a pico, tensão eficaz e tensão média. Também incluirá a análise do erro com base em cada teste.

**Capítulo 5 - Análise dos resultados:** No capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos com a automatização dos testes e análise dos resultados.

**Capítulo 6 - Considerações finais:** O último capítulo irá abordar as conclusões do trabalho e as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do projeto e possíveis melhorias futuras.

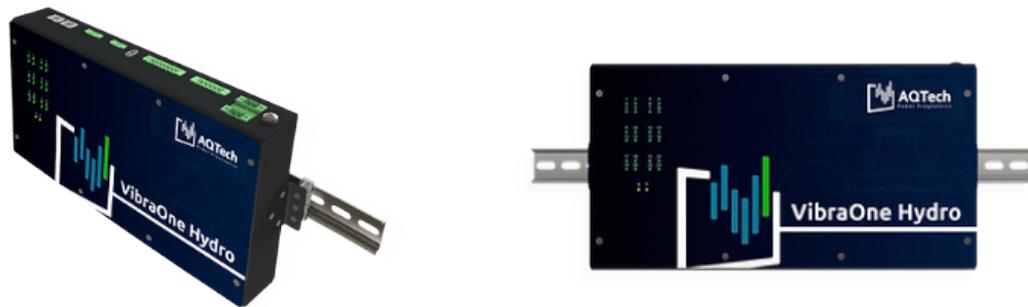


## 2 VibraOne

### 2.1 Equipamento VibraOne

O VibraOne é um equipamento CMS (Sistema de monitoramento de condição) projetado para realizar o monitoramento contínuo e registro das condições operacionais de unidades geradoras de energia, desempenhando um papel crucial no setor de geração de energia elétrica (Figura 1). Sua funcionalidade incluem a detecção de falhas e perturbações, permitindo uma validação constante do funcionamento e desempenho dos sistemas de campo. Este sistema é composto por diversas funcionalidades, incluindo processamento, entradas analógicas, entradas digitais, saídas digitais e interfaces de comunicação. Em relação ao seu monitoramento contínuo e o registro de condições operacionais, eles são realizados por meio de entradas analógicas, digitais e outros recursos incorporados, como apresentado na Figura 2. O VibraOne desempenha um papel essencial na garantia da operação eficiente e confiável das unidades geradoras, destacando-se como uma solução integral no cenário da geração de energia elétrica.

Figura 1 – Dispositivo VibraOne.

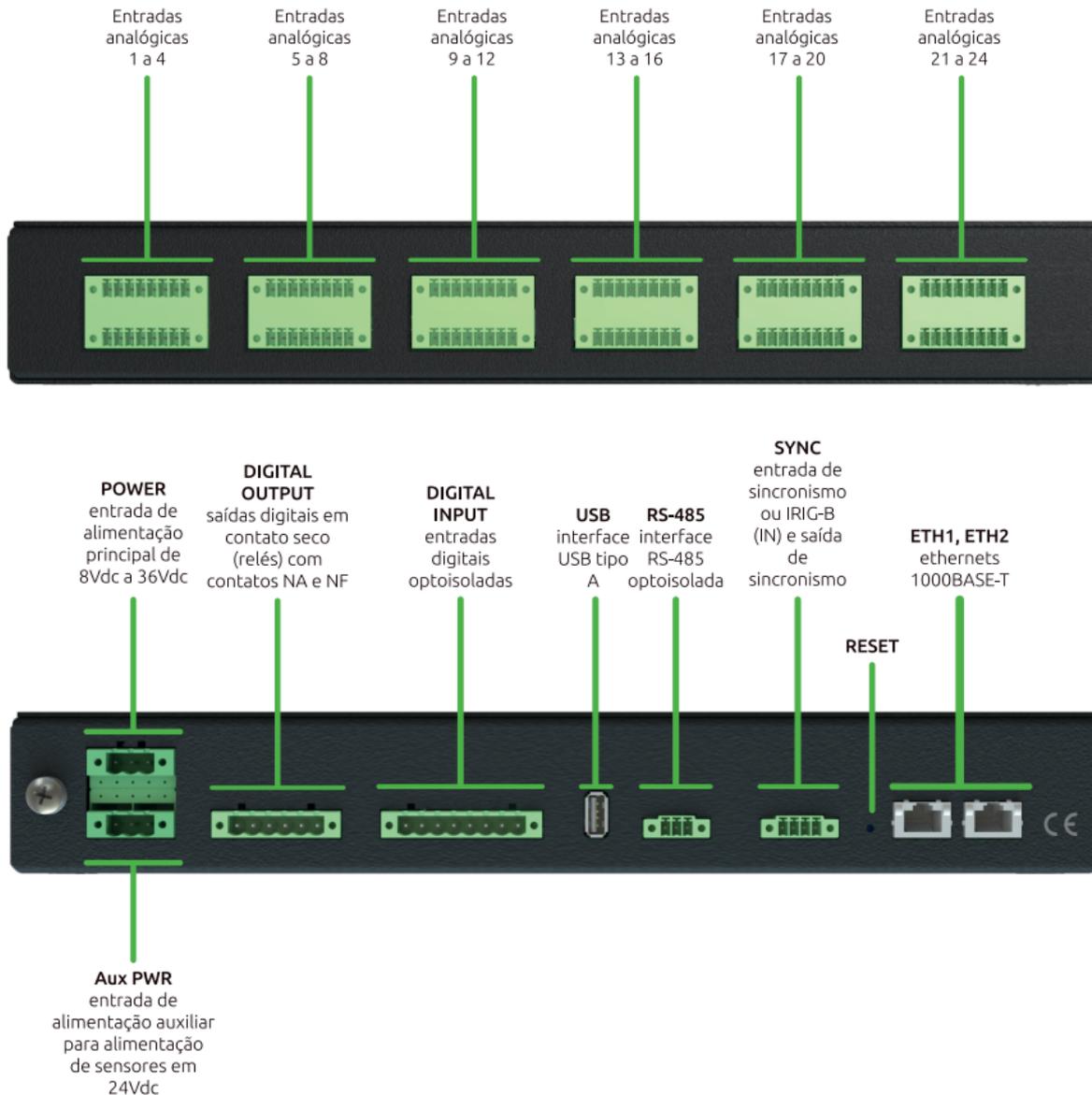


Fonte: [AQTech Power Prognostics]

Atualmente, o VibraOne é predominantemente utilizado para monitorar ativos como aerogeradores e hidrgeradores, apresentando modelos com 24 e 16 canais de entradas analógicas configuráveis. Essas entradas permitem a conexão de diversos sensores para monitoramento, como sensores de pressão, proximetros, acelerômetros, acústicos, fluxo magnético, temperatura, entre outros. Com resolução de 24 bits e uma taxa de amostragem de até  $50\text{ kHz}$ , as entradas analógicas fornecem dados precisos. Além disso, o VibraOne suporta temperaturas de operação entre  $20^{\circ}\text{C}$  até  $70^{\circ}\text{C}$  e é capaz de sincronizar-se com a base de dados via uma interface Ethernet. Entradas e saídas digitais que podem ser utilizadas de diversas maneiras como, por exemplo, interagir com outros dispositivos do cliente. Em relação a seção de entradas analógicas do VibraOne, ela é composta por conexões específicas, um circuito de tratamento de sinal e um conversor A/D. Entre a

entrada de sinais e a unidade de tratamento do sinal, há os switches de configuração - também chamados de DIPs. Esses switches são responsáveis de especificar quais são os tipos de sensores que estão sendo conectados em cada entrada analógicas do VibraOne. Então para cada um dos testes apresentados, há uma configuração dos switches específica. Tal estrutura é apresentada de maneira simplificada na Figura 3.

Figura 2 – Interface física VibraOne.



Fonte: [AQTech Power Prognostics].

# 3 Desenvolvimento de um Procedimento de Testes para o Equipamento VibraOne

## 3.1 Estrutura dos testes manuais

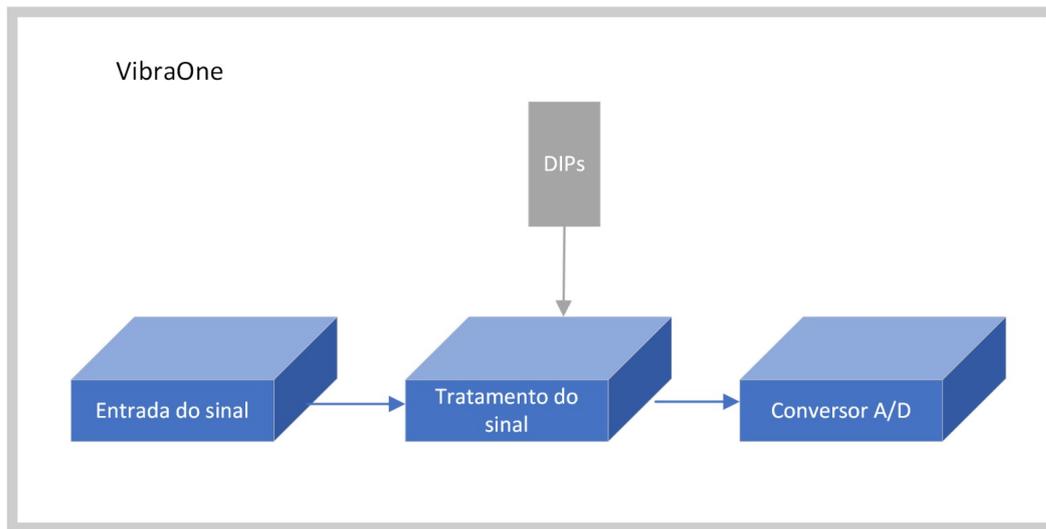
Atualmente, na empresa AQTech, os testes do VibraOne são conduzidos manualmente. O usuário inicia separando os equipamentos, como o multímetro digital de bancada e o gerador de sinais. Em seguida, realiza as conexões necessárias entre os dispositivos e seleciona os VibraOnes específicos a serem testados. Posteriormente, estabelece a conexão entre o computador e o VibraOne utilizando um cabo de rede, verificando tanto a conexão como os sinais registrados pelo VibraOne por meio dos softwares legados da empresa. A configuração dos valores do sinal necessário para os testes é realizada manualmente no gerador de sinais, enquanto a calibração é feita visualizando diretamente o multímetro de bancada. Após a calibração, a configuração dos switches das entradas analógicas e a visualização das informações no programa legado, o usuário procede ao salvamento manual dessas informações em pastas organizadas no computador. Além disso, manualmente insere os pontos de amostragem dos sinais adquiridos nas entradas analógicas em um modelo de tabela pré pronto no Excel. Essa tabela é então usada para realizar os cálculos de tensão média, eficaz e pico a pico, assim como os cálculos de erros para cada parâmetro. Esse processo é repetido para todos os quatro tipos de testes, permitindo ao usuário identificar possíveis problemas com o VibraOne.

## 3.2 Estrutura dos Testes Automatizados

Para a solução do projeto, foi montada uma estrutura que engloba tanto a parte de software quanto a parte de hardware. Na parte de hardware, incluem-se o computador de operação que o usuário utilizará para realizar os testes automatizados, o equipamento VibraOne a ser testado, o multímetro digital e o gerador de sinais. Já a parte de software compreende o programa com uma interface do usuário que permite ao mesmo realizar os procedimentos necessários para os testes, os módulos de programação para executar todos os procedimentos de aquisição do sinal, calibração, cálculo dos parâmetros necessários e o gerador de relatórios. A parte de software é detalhada com mais profundidade no Capítulo 4.

O processo de teste do equipamento VibraOne é iniciado com o usuário realizando

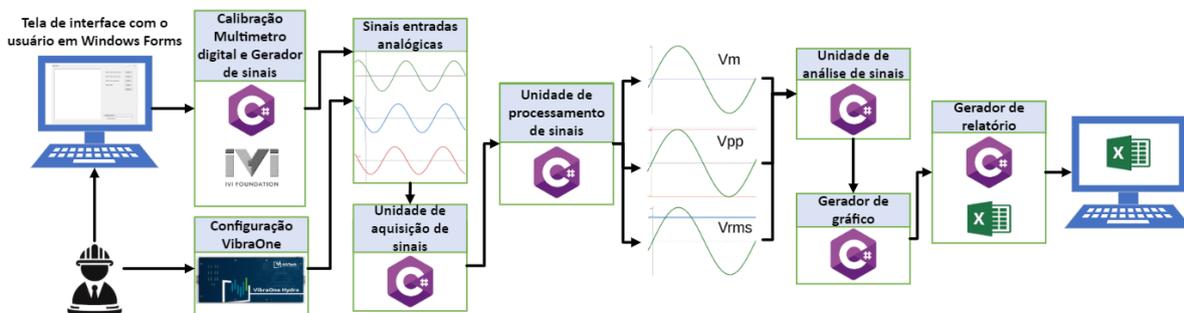
Figura 3 – Diagrama simplificado da entrada do dispositivo VibraOne.



Fonte: Autoria Própria.

todas as conexões possíveis com os dispositivos envolvidos: Multímetro digital, gerador de sinais, computador e o dispositivo VibraOne como apresentado na Figura 5. Em seguida, são inicializadas as instruções do software de testes automatizados para as configurações dos DIPs do VibraOne para cada tipo de teste. Após configuradas as ordens dos DIPs, o programa faz uma auto calibração do gerador de sinais com base nos valores recebidos pelo multímetro digital e adquire as informações de saída do dispositivo. Por fim, após a realização de todos os quatro testes, são processados os valores e gerado o relatório ao usuário contendo os resultados obtidos dos testes. É disponibilizada também a resposta sobre a validação do dispositivo VibraOne. Todo esse processo é ilustrado em detalhes na Figura 4.

Figura 4 – Solução proposta para os testes das entradas analógicas do equipamento VibraOne.

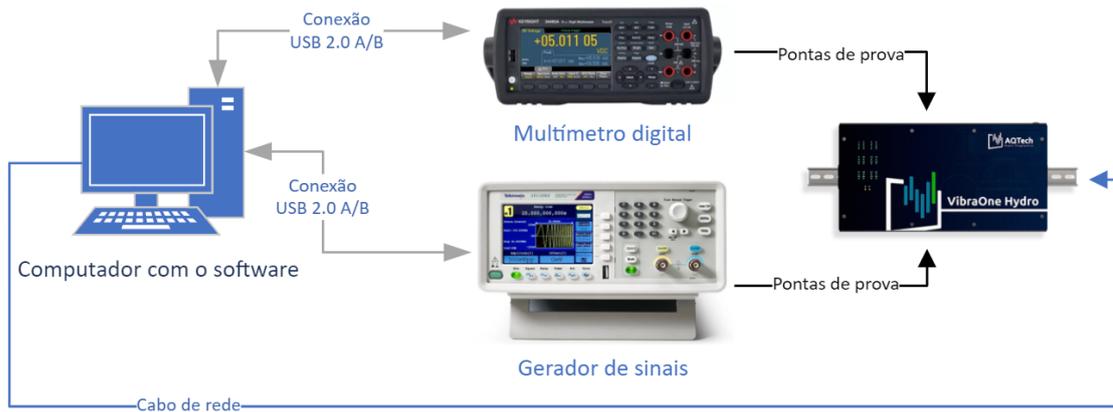


Fonte: Autoria Própria.

Para a realização dos testes automatizados das entradas analógicas no equipamento, é necessário que os dispositivos (Multímetro e Gerador de sinais) possam ser conectados

por USB ao computador e também que suportem o protocolo VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*). VISA é um protocolo de comunicação padrão da indústria que fornece comunicação com instrumentos que estão conectados ao computador através de vários barramentos de comunicação [Cheij 2001].

Figura 5 – Esquemático da estrutura física dos testes nas entradas analógicas VibraOne.



Fonte: Autoria Própria.

A estrutura de testes automatizados das entradas analógicas do é realizada conforme a Figura 5. Primeiramente, o computador é conectado via USB aos dispositivos multímetro digital e Gerador de sinais. Também conectado ao VibraOne via cabo de ethernet. Em seguida, os instrumentos de medição são conectados em paralelo as entradas analógicas do equipamento, a fim de calibrar automaticamente via software os sinais a serem aplicados nas entradas.

Para cada tipo de teste, há uma configuração de DIPs diferente que afetam os valores lidos do sinal de entrada devido a alteração dos componentes no circuito de tratamento do sinal. Por esse motivo, os valores de adquiridos no dispositivo devem sofrer pequenas alterações dos valores de saída devido a essa estrutura. Essas alterações são levadas em consideração nos cálculos dos resultados finais para a validação do dispositivo. Como os testes são complementares, é necessário a realização de todos os testes para a identificação do de um eventual defeito da placa.

### 3.3 Aplicação dos testes

#### 3.3.1 Teste $3V_{ac}$ , $3V_{dc}$ em escala de $30V$

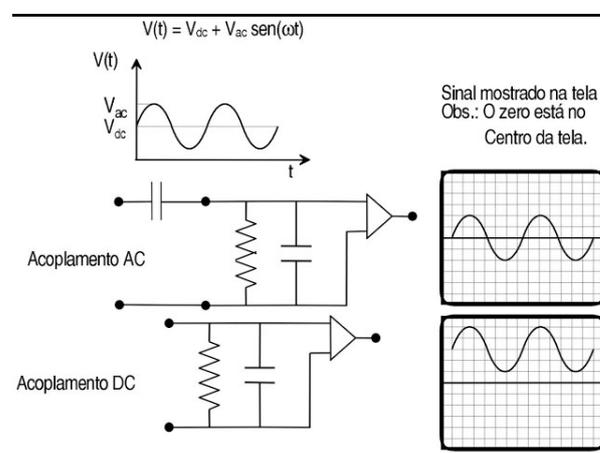
Para o primeiro teste, aplica-se nas entradas analógicas um sinal composto por uma componente de corrente contínua de  $3V$  somada a uma corrente alternada de  $3V_{RMS}$  com frequência de  $100Hz$ . A configuração dos DIPs para esse teste inclui a habilitação do

switch de ganho para considerar que o sinal entra com um valor amplificado, desabilitação do switch de acoplamento AC, do switch “Corrente”, e do switch de alimentação dos diodos. Com essa configuração, a aquisição de sinal no equipamento deve apresentar, após o tratamento do sinal de entrada, uma forma de onda esperada. Esta forma de onda mantém o mesmo perfil do sinal de entrada, porém com valores menores devido à consideração de ganho na entrada. Se, por exemplo, a entrada não apresentar a componente de corrente contínua, o software detectará uma incoerência com base no valor médio de tensão da porta, conforme observado neste primeiro teste.

### 3.3.2 Teste $3V_{ac}$ , $3V_{dc}$ em escala de $5V$

No segundo teste, é aplicado nas entradas analógicas um sinal composto por uma componente de corrente contínua de  $3V$  somada a uma corrente alternada de  $3V_{RMS}$  com frequência de  $100Hz$ . A configuração dos DIPs para esse teste mantém todos os switches desabilitados como: o switch de ganho para avisar ao equipamento que não há amplificação do sinal de entrada, o switch de acoplamento AC, o switch "Corrente" e o switch de alimentação dos diodos. Nessa configuração, a aquisição de sinal no equipamento deve apresentar, após o tratamento do sinal de entrada, uma forma de onda esperada contendo apenas a componente de corrente alternada, sem a presença da componente de corrente contínua, devido ao acoplamento AC. Essa corrente alternada deve manter valores próximos aos da entrada. O acoplamento AC permite apenas a passagem do sinal alternado, enquanto o acoplamento DC possibilita a passagem tanto do sinal alternado quanto do contínuo, conforme ilustrado na Figura 6 [Glauco 2017]. Portanto, se, por exemplo, no segundo teste, houver a presença da componente de corrente contínua na saída, juntamente com a componente alternada, isso indicaria a existência de algum problema na porta.

Figura 6 – Acoplamento AC e DC de um osciloscópio.



Fonte: [Glauco 2017]

### 3.3.3 Teste $6 V_{ac}$ em corrente

Para o terceiro teste, é aplicado nas entradas analógicas um sinal somente uma corrente alternada de  $6 V_{RMS}$  com frequência de  $100 Hz$ . A configuração dos DIPs para esse teste mantém todos os switches desabilitados com exceção do switch “Corrente”. Nessa configuração, a aquisição de sinal no equipamento deve apresentar, após o tratamento do sinal de entrada, uma forma de onda composta apenas pela componente de corrente alternada e os seus valores de amplitude alterado devido a configuração do circuito analógico habilitado quando o switch de “Corrente” foi acionado. Esse teste tem como principal objetivo verificar o comportamento de sensores de entreferro e fluxo magnético, por exemplo.

### 3.3.4 Teste IEPE

O termo IEPE, que significa "Integrated Electronics PiezoElectric" (Eletrônica Integrada Piezoelétrica), refere-se a um tipo de sistema de condicionamento de sinal usado com sensores piezoelétricos, como acelerômetros e sensores acústicos. Esses sensores geram uma carga elétrica em resposta a uma força mecânica, como vibrações ou aceleração. Essa carga elétrica é convertida em tensão pelo sistema eletrônico integrado [Arar 2022]. Portanto, para o teste IEPE, é necessário apenas ligar o dispositivo VibraOne, sem a injeção de sinais nas entradas analógicas. A configuração dos DIPs para este teste mantém todos os switches habilitados, exceto o switch de ganho. É importante observar que este é o único teste em que os switches de diodos estão habilitados. Assim, é esperado que não haja sinal nas entradas das portas analógicas provenientes do gerador de sinais, e que apenas correntes dos diodos alimentem a unidade de tratamento do sinal antes de acessar o conversor analógico-digital. Este teste tem como objetivo analisar se há alguma alimentação atuando nas entradas analógicas, derivada de algum curto interno ou defeito nos diodos associados à entrada.

## 3.4 Tratamento dos dados

Como mostrado na Figura 4, após os sinais de entradas serem injetados no equipamento, eles também são enviados para a unidade de aquisição de sinais. Essa parte do software é responsável por adquirir os o sinal de entrada após o conversor analógico digital do equipamento. Dessa maneira, o conversor faz a amostragem e quantização do sinal.

O teorema da amostragem diz que um sinal  $x(t)$  com espectro limitado em banda a  $A[Hz]$  pode ser reconstruído a partir de suas amostras se o mesmo for amostrado a uma frequência  $f_s$  maior que  $2 * A[Hz]$  [Lathi 2006]. Entretanto, satisfazer o teorema da amostragem na prática não é suficiente para obter o sinal de maneira satisfatória, conforme evidenciado pelo experimento de M. Dossi. O experimento, ao empregar uma frequência de

amostragem 5,2 vezes maior que a máxima frequência do sinal, obteve um valor de 78,9% do pico esperado para o sinal de entrada. Aumentando a frequência de amostragem para 40 vezes a máxima frequência do sinal, o experimento alcançou um valor de 99,6% do esperado [Dossi, Forte e Pipan 2018]. Dessa forma, a frequência de amostragem utilizada seguiu o padrão do conversor AD ( $f_s = 20 \text{ kHz}$ ), enquanto a frequência fundamental do sinal aplicado foi de  $100 \text{ Hz}$ . Assim, a frequência de amostragem está 200 vezes maior que a frequência do sinal de entrada, atendendo plenamente às necessidades do projeto.

Após a passagem pela unidade de aquisição de sinais. Os dados são enviados a unidade de processamento de sinais. Essa parte do software é responsável por processar os sinais amostrados da entrada pelo dispositivo VibraOne. São realizados os cálculos de tensão média, tensão eficaz e tensão de pico a pico dos sinais.

O cálculo da tensão média é dado pelo cálculo do valor médio de um sinal. O valor médio de um sinal é dado pela integral no período do sinal de tensão no tempo dividido pelo período [Lathi 2006]:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt.$$

Já o cálculo do valor eficaz, também chamado de tensão RMS, se dá pela medida eficaz da magnitude da tensão em uma forma de onda alternada e é definida como a raiz quadrada da média dos quadrados dos valores instantâneos da tensão ao longo de um período [Caús et al. 2021]:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt.}$$

Também foram obtidos os valores de pico a pico do sinal senoidal. Os valores de pico a pico correspondem à diferença entre os valores máximos positivo e negativo da forma de onda [Caús et al. 2021].

Por fim, são calculados os erros dos valores de tensão média, eficaz e de pico a pico para cada uma das entradas analógicas. O cálculo do erro foi baseado nos valores esperados para cada um dos testes e dividido pelo fundo de escala:

$$Erro\% = 100 \frac{|Valor Medido - Valor Esperado|}{FundoDeEscala}.$$

O cálculo do erro dividindo pelo fundo de escala é adequado para avaliar a precisão em termos proporcionais ao alcance total da medição. O valor obtido deve ser expresso em relação ao intervalo total da escala de medição [Dias 1994].

O critério de aceite do equipamento VibraOne para os erros foi estipulado até 1% em relação ao erro baseado no fundo de escala. Acima de 1%, placa deve ser revisada

---

pelo usuário e é considerada como reprovada nos critérios de qualidade. Erros maiores do que 0,5% foram estabelecidos como de atenção para as entradas analógicas envolvidas no resultado do erro. Dessa maneira, fica a critério do usuário, com base nos roteiros de validação dos testes, aceitar os resultados obtidos.



## 4 Desenvolvimento do software

### 4.1 Estrutura geral

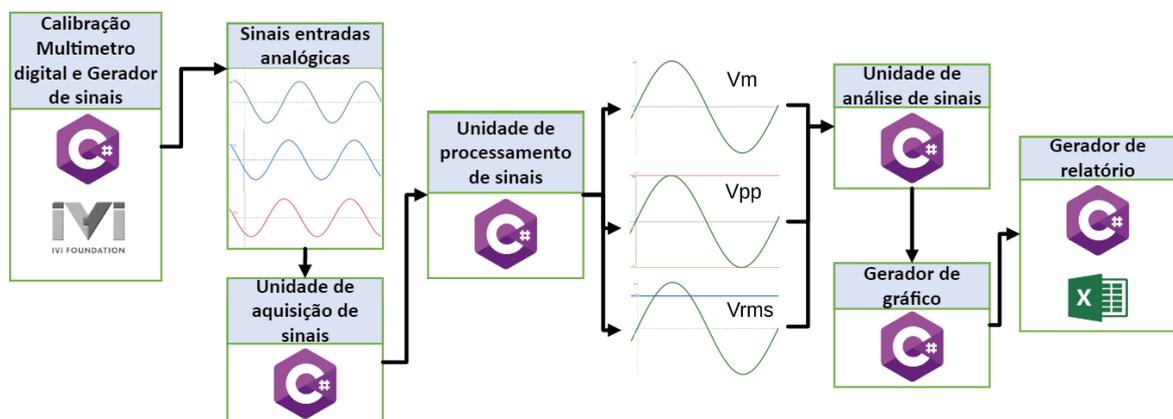
O desenvolvimento do software foi de autoria própria, realizado em Windows Forms baseado no framework Microsoft .NET na linguagem de programação C# (C sharp). As unidades que compõem o software podem ser vistas na Figura 7.

A linguagem de programação C# é uma linguagem de programação moderna, orientada a objetos e desenvolvida pela Microsoft. Introduzida em 2000 como parte da plataforma .NET, C# é projetada para criar aplicativos Windows robustos e escaláveis, mas também é usada em uma variedade de contextos, incluindo desenvolvimento web, serviços em nuvem e aplicativos móveis [Wagner 2023].

Windows Forms é uma estrutura de interface do usuário para criação de aplicativos de área de trabalho avançados no Windows, oferece suporte a recursos como controles, gráficos e entrada de usuário. Com um designer visual no Visual Studio, facilita a criação intuitiva de aplicativos [Steve 2023].

A conexão com os equipamento e reconhecimento foi realizada utilizando as ferramentas e bibliotecas da empresa IVI foundation. A Fundação IVI é um consórcio aberto dedicado à promoção de especificações para a programação de instrumentos de teste, visando simplificar a intercambialidade, oferecer melhor desempenho e reduzir os custos de desenvolvimento e manutenção de programas. Seus padrões abrangem normas gerais para drivers de instrumentos em diversos ambientes de desenvolvimento, estabelecendo elevados padrões de qualidade e completude [O que é IVI? 2023].

Figura 7 – Estrutura geral Software de testes automatizados Entradas analógicas.



Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 Interface usuário

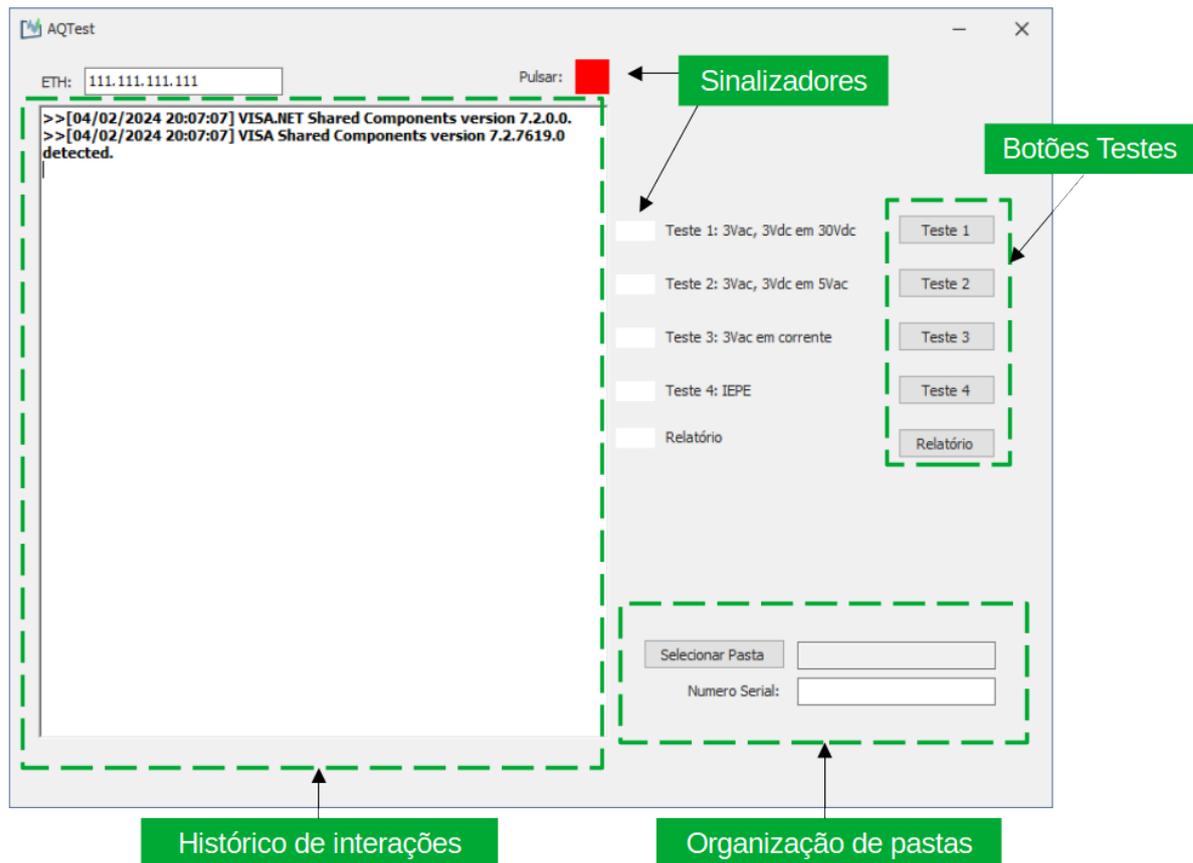
A interface de usuário foi projetada para atender as necessidades do usuário, com botões desenhados para cada um dos quatro tipos de teste, além de controles para organizar relatórios e gerar relatórios finais. Ao clicar em qualquer botão de teste, o usuário é guiado pelo software para realizar os procedimentos necessários para o teste selecionado. A interface também inclui campos para conexão com o equipamento e indicadores visuais para verificar a ativação da conexão. Se a conexão está ativa, o indicador permanece verde; caso contrário, ele muda para vermelho, alertando o usuário para verificar a conexão com o equipamento. Além disso, existem indicadores específicos para cada um dos quatro testes e para o relatório. Se ocorrer algum problema durante o teste, o indicador correspondente muda para vermelho, sinalizando ao usuário que houve algum problema na execução do teste, como a falta de conexão do multímetro digital às entradas. Caso o teste tenha sido executado com sucesso, o indicador muda para verde. Todas essas informações podem ser visualizadas na Figura 8. Por fim, há uma sub-tela de histórico de interações, integrada à interface principal do software. Essa sub-tela tem como objetivo manter o usuário atualizado sobre todos os passos automáticos realizados pelo software e os passos executados pelo próprio usuário durante a interação. As informações detalhadas podem ser observadas conforme ilustrado Figura 8.

## 4.3 Sistema de calibração

O sistema de calibração está contido na unidade do software responsável pela calibração do sinal de entrada. Ele interage com o gerador de sinais e o multímetro digital tendo objetivo de calibrar o sinal de entrada para cada tipo de teste da operação. No caso da solução proposta, a calibragem foi feita por uma lógica de programação, apresentada na Figura 9, que simula uma estrutura de controle do tipo proporcional. Essa estrutura, também conhecida como controlador proporcional, é um componente essencial em sistemas de controle automático que visa reduzir o erro entre o valor desejado (referência) e o valor atual do sistema. O controle proporcional opera proporcionalmente à discrepância entre esses valores, gerando um sinal de controle proporcional à magnitude do erro [SILVA e Trofino 2021]. A seguir a equação utilizada para encontrar a tensão de pico a pico durante a execução do sistema de calibração:

$$V_{Picoapico} = (V_{rmsGerador} - K_p V_{rmserro})\sqrt{2} + V_{dc}.$$

Figura 8 – Software de automatização dos testes entradas analógicas.

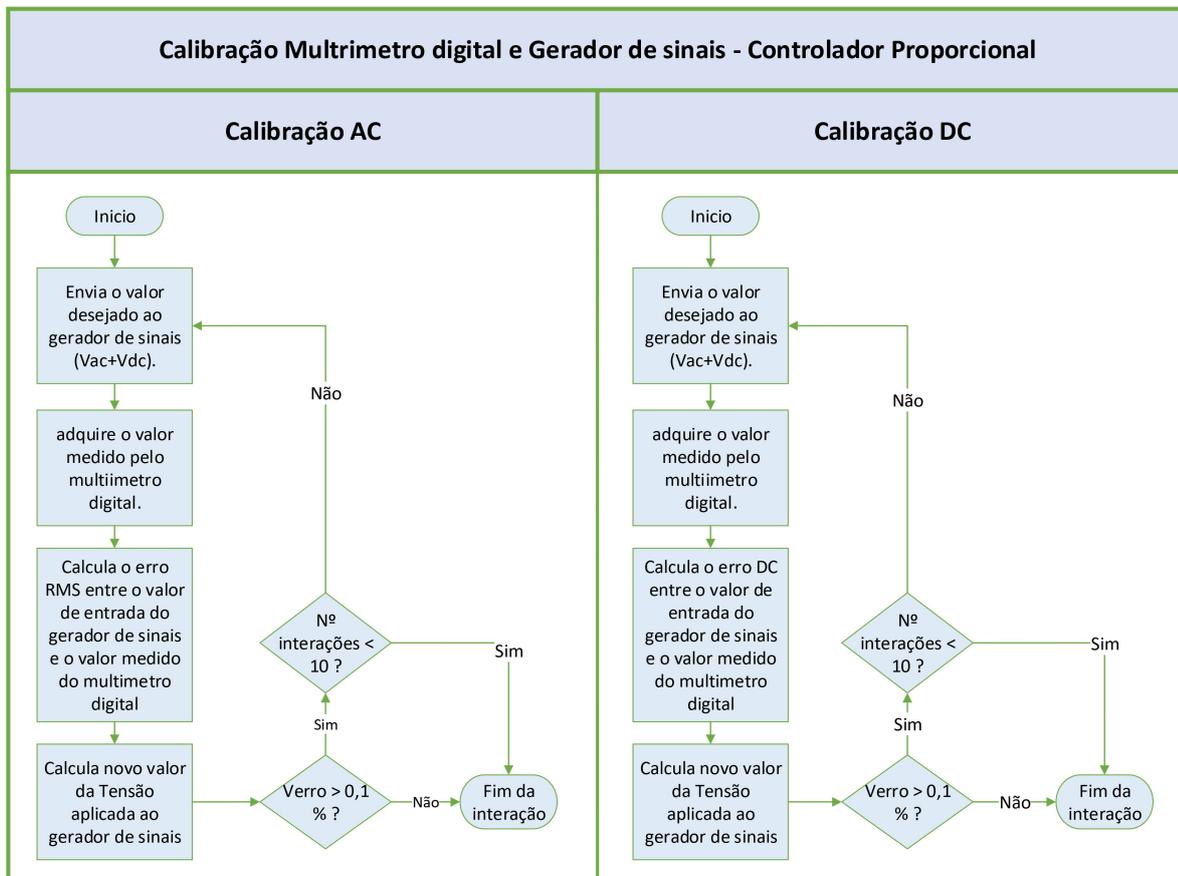


Fonte: Autoria Própria.

## 4.4 Unidade de aquisição dos dados

A unidade de aquisição de dados é responsável por acessar o equipamento VibraOne e obter as informações em tempo real que estão sendo injetadas nas entradas analógicas do dispositivo. Nessa unidade, há bibliotecas próprias da empresa AQTech que foram utilizadas para efetuar a comunicação com o VibraOne. A etapa de aquisição de dados acontece logo após a unidade de calibração ajustar o sinal de entrada do equipamento. Para o sinal dos testes, que é de  $100\text{ Hz}$ , foi utilizada uma taxa de amostragem de  $20\text{ kHz}$  e 3 segundos para o tempo de aquisição do sinal. Com isso, obtém-se por volta de 200 períodos do sinal injetado a cada segundo e 200 pontos de amostragem para cada período. Logo, é adquirido, para 3 segundos de tempo de amostragem, cerca de 600 períodos do sinal de entrada. Dessa maneira, é possível obter facilmente os valores de pico dos semiciclos dos períodos.

Figura 9 – Fluxograma do sistema de calibração do sinal AC e o sinal DC.



Fonte: Autoria Própria.

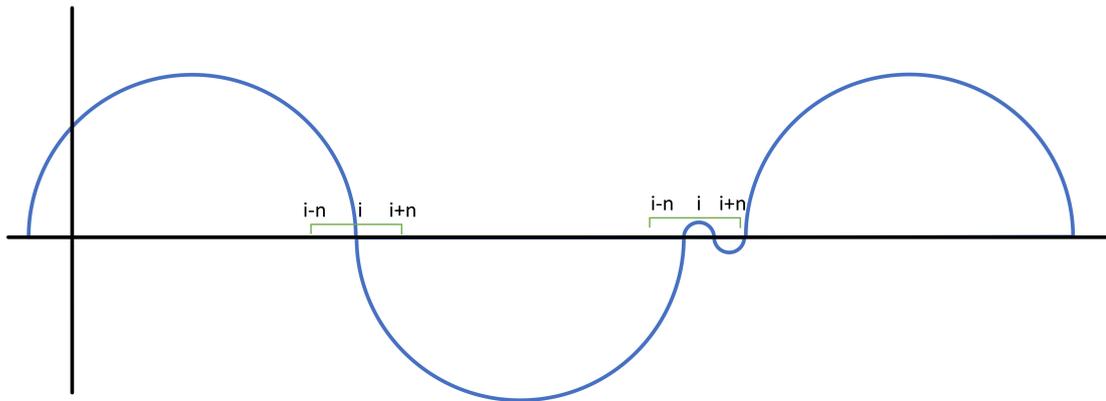
## 4.5 Unidade de processamento de sinais

A unidade de processamento de sinais é executada seguidamente da unidade de aquisição de sinais. Ela tem como objetivo realizar os cálculos de tensão média, tensão de pico a pico e tensão eficaz dos sinais adquiridos.

Para o cálculo da tensão média, a unidade simplesmente calcula a média de cada sinal de entrada. Já o cálculo da tensão eficaz é realizado a partir do processo de integração do sinal bem como visto capítulo 3.4. Em seguida, para o cálculo de valor de pico a pico, foi adotada a abordagem de detectar o cruzamento por zero do sinal de corrente alternada retirado anteriormente sua componente de corrente contínua do cálculo. Dessa maneira, criou-se um algoritmo para detectar a transição da onda senoidal entre as partes positivas e negativas da corrente alternada. O método então entra em um loop que percorre as amostras do sinal. Dentro desse loop, ele verifica se há uma transição positiva e, em seguida, se há uma transição negativa. Essas verificações são feitas considerando uma margem de amostras para garantir a troca de semiciclo da amostra.

Após o loop, verifica se há o mesmo número de pares de semiciclos e, em seguida, calcula o valor pico a pico entre os semiciclos positivos e negativos. Isso é feito somando

Figura 10 – Representação gráfica de atuação do algoritmo para detectar a transição de semiciclo do sinal.



Fonte: Autoria Própria.

os valores de pico desses semicírculos. Ao final do processo, a média dos valores de pico a pico é calculada, representando a tensão pico a pico para o canal de entrada analógica.

## 4.6 Unidade de análise de sinais

A unidade de análise de sinais tem a responsabilidade de avaliação dos dados processados. Verifica se as entradas estão de acordo com o critério de qualidade para a validação dos equipamentos.

## 4.7 Gerador de gráfico e relatório

Por ultimo, tem-se o processo de geração dos gráficos e relatório dos dados processado. Ambos foram desenvolvidos com a biblioteca da Microsoft para manipulação de elementos em Excel disponível para C#. Essa parte do código tem responsabilidade de gerar as informações necessárias para auxiliar o usuário na validação dos equipamentos VibraOnes.

O relatório final é apresentado ao usuário todos resultados dos cálculos de tensão média, tensão pico a pico e tensão de RMS de todos os testes aplicados ao equipamento VibraOne bem como o resultado dos erros e as amostras do sinais de entrada. Além também dos gráficos contendo os sinais das entradas analógicas e os gráficos para verificar a calibração dos equipamentos de medição e geração dos sinais. Como já mencionado no Capítulo 3.4, o relatório exhibe para o usuário se o equipamento está ou não reprovado com base nos dados processados.



## 5 Resultados

Para avaliar a aplicação do software de automatização de testes, foram separados dois equipamentos em pleno funcionamento. Para esses equipamentos, foram executados os testes automatizados diversas vezes e separados alguns dos resultados para ser disponibilizado nesse trabalho. Foram selecionados para o trabalho acadêmico três baterias de resultados finais de cada um dos quatro tipo testes, sendo que para uma dessas baterias de testes, foram aplicados erros propositais durante a execução dos testes automatizados.

Para iniciar a avaliação dos resultados obtidos, tem-se a tabela 1 referente aos resultados obtidos do primeiro teste. Foi injetado, nas entradas analógicas, o sinal com componente de corrente alternada de  $3V_{RMS}$  somada a uma componente de corrente contínua de  $3V$ . Observa-se que os erros calculados em todos os parâmetros de análise estão coerentes com o resultado esperado de um equipamento em bom estado. Entretanto verificou-se que em todos os testes realizados nos dois equipamentos, houve, no Erro de  $V_{rms}$ , valores por volta de 0,64%, os quais pertencem a uma classificação de atenção à região do teste aplicado.

Tabela 1 – Resultados referentes ao teste 1 no VibraOne 1.

	Teste 1: 3Vac + 3Vdc em escala de 30V					
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
EA 01	0,4731	0,0042	0,4753	0,6491	1,3476	0,0197
EA 02	0,4705	0,0128	0,4729	0,6570	1,3409	0,0024
EA 03	0,4729	0,0050	0,4744	0,6520	1,3452	0,0120
EA 04	0,4723	0,0068	0,4749	0,6502	1,3468	0,0173
EA 05	0,4728	0,0051	0,4759	0,6470	1,3492	0,0253
EA 06	0,4743	0,0002	0,4764	0,6455	1,3507	0,0303
EA 07	0,4703	0,0136	0,4716	0,6613	1,3379	0,0125
EA 08	0,4748	0,0014	0,4758	0,6472	1,3497	0,0269
EA 09	0,4743	0,0002	0,4756	0,6481	1,3485	0,0228
EA 10	0,4704	0,0132	0,4720	0,6599	1,3386	0,0101
EA 11	0,4743	0,0003	0,4753	0,6491	1,3477	0,0203
EA 12	0,4746	0,0008	0,4750	0,6501	1,3474	0,0190
EA 13	0,4748	0,0016	0,4756	0,6481	1,3487	0,0236
EA 14	0,4728	0,0051	0,4743	0,6523	1,3453	0,0121
EA 15	0,4722	0,0071	0,4742	0,6527	1,3439	0,0076
EA 16	0,4747	0,0012	0,4765	0,6451	1,3509	0,0308
EA 17	0,4721	0,0074	0,4737	0,6542	1,3430	0,0047
EA 18	0,4776	0,0110	0,4790	0,6367	1,3582	0,0552
EA 19	0,4748	0,0016	0,4767	0,6444	1,3514	0,0325
EA 20	0,4748	0,0014	0,4755	0,6483	1,3485	0,0228
EA 21	0,4731	0,0041	0,4741	0,6531	1,3439	0,0077
EA 22	0,4755	0,0037	0,4765	0,6449	1,3512	0,0320
EA 23	0,4745	0,0004	0,4762	0,6460	1,3502	0,0286
EA 24	0,4757	0,0045	0,4776	0,6413	1,3543	0,0421

Fonte: Autoria Própria.

Todavia, com o intuito de verificar os dados produzidos para o experimento, foi realizado testes completo contendo erros propositais. No caso do teste 1, foram acrescentados erros de configuração nas entradas EA 03, 06, 15 e 20 do primeiro VibraOne, à fim de validar o erro sendo visto no relatório final. Observa-se na tabela 2 que o software conseguiu

visualizar os erros nas entradas descritas. Os valores de erro referentes a tensão média, tensão eficaz e tensão de pico a pico estão bem distintos dos valores aceitáveis para o respectivo teste nas entradas 06 e 20. Já nas entradas 03 e 15 foi observada a irregularidade no erro da tensão média. Houve essa diferença de observação do software em relação as entradas devido ao fato que foram realizadas configurações erradas arbitrárias nas entradas selecionadas. Os demais testes reproduzidos propositalmente errados foram colocados nos anexos F, G e H.

Tabela 2 – Resultados contendo erros propositais referente ao teste 1 no VibraOne 1.

	Teste 1: 3Vac + 3Vdc em escala de 30V					
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
EA 01	0,4697	0,0154	0,4751	0,6497	1,3465	0,0161
EA 02	0,4671	0,0241	0,4727	0,6578	1,3393	0,0078
EA 03	2,1550	5,6023	0,4703	0,6657	1,3377	0,0130
EA 04	0,4689	0,0180	0,4747	0,6510	1,3452	0,0118
EA 05	0,4695	0,0162	0,4757	0,6477	1,3474	0,0193
EA 06	2,5006	6,7542	2,4535	5,9451	7,5220	20,6014
EA 07	0,4670	0,0246	0,4714	0,6620	1,3361	0,0185
EA 08	0,4714	0,0097	0,4757	0,6477	1,3477	0,0201
EA 09	0,4710	0,0113	0,4754	0,6488	1,3467	0,0169
EA 10	0,4670	0,0243	0,4718	0,6607	1,3370	0,0153
EA 11	0,4709	0,0115	0,4750	0,6499	1,3464	0,0157
EA 12	0,4712	0,0103	0,4748	0,6508	1,3457	0,0135
EA 13	0,4715	0,0096	0,4754	0,6488	1,3466	0,0166
EA 14	0,4693	0,0169	0,4741	0,6529	1,3434	0,0058
EA 15	-0,0060	1,6011	0,4738	0,6540	1,3439	0,0076
EA 16	0,4713	0,0103	0,4762	0,6460	1,3492	0,0251
EA 17	0,4687	0,0189	0,4734	0,6553	1,3411	0,0017
EA 18	0,4740	0,0010	0,4788	0,6374	1,3560	0,0477
EA 19	0,4714	0,0097	0,4764	0,6453	1,3498	0,0272
EA 20	0,0681	1,3542	0,0680	2,0068	0,1938	3,8260
EA 21	0,4697	0,0154	0,4738	0,6541	1,3424	0,0026
EA 22	0,4720	0,0077	0,4762	0,6458	1,3491	0,0250
EA 23	0,4710	0,0112	0,4759	0,6471	1,3481	0,0216
EA 24	0,4722	0,0073	0,4773	0,6424	1,3522	0,0353

Fonte: Autoria Própria.

Para a situação de valores de erro entre 0,5% e 1,0%, o usuário então deve se atentar e verificar os procedimentos de avaliação para o teste 1 ao estado de atenção as entradas analógicas referentes ao parâmetro atingido. Mesmo que os valores pertençam a regiões aceitáveis de qualidade definidos para a aprovação do equipamento. Como visto no capítulo 3.4.

Em relação ao segundo teste, foram registrados valores excelentes de saída para um equipamento em excelente estado como mostrado nos anexos A e B. Para o terceiro teste, obteve-se valores em todos os parâmetros e erros em níveis excelentes - Não havendo valores de erros acima de 0,5% como pode-se observar nos anexos C e D. Contudo, os testes de corrente nas vezes que foram executados no VibraOne 1, sempre atingiram o numero máximo de interações no processo de calibração do gerador de sinais. Esse evento pode ser um sinal de algum problema não mapeado nos processos de validação.

Por fim, em relação aos resultados do teste 4, que abordou os processos de IEPE, nenhum dos resultados foi considerado satisfatório. Todos os valores encontraram-se fora

da faixa aceitável (entre  $5\text{ mA}$  a  $11\text{ mA}$ ), conforme apresentado no Anexo E. Esse fenômeno está relacionado às versões mais antigas dos equipamentos VibraOne. Os testes foram realizados em unidades de versionamento anterior, o que resultou em valores de saída superiores aos limites de aceitação atuais devido a mudanças do circuito elétrico no tratamento das entradas analógicas. Nos equipamentos VibraOne mais recentes, os valores se manteriam dentro dos níveis de aceitação.

## 5.1 Otimização do tempo

Para avaliar a eficiência temporal entre testes manuais e automatizados no VibraOne, foram conduzidos experimentos com usuários experientes e inexperientes. Nos testes manuais, a média de tempo para conclusão sem detecção de erros foi de 8 minutos, elevando-se para aproximadamente 16 minutos para usuários iniciantes. Já nos testes automatizados, usuários experientes concluíram os procedimentos em cerca de 4 minutos, enquanto usuários iniciantes demandaram em média 6 minutos. Esses resultados destacam ganhos consideráveis de eficiência, especialmente notáveis para usuários iniciantes, evidenciando uma economia de tempo significativa, conforme sumarizado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos na realização dos testes manuais e automáticos.

Usuários	Testes manuais	Testes automatizados	Razão economia de tempo
Usuário experiente	8 minutos	4 minutos	50 %
Usuário iniciante	16 minutos	6 minutos	62,5 %

Fonte: Autoria Própria.



## 6 Conclusão

Ao considerar o objetivo principal do projeto, que é otimizar o tempo para a validação das entradas analógicas por meio de um software de automação de testes, observou-se que o tempo médio de execução do teste, desde a montagem do equipamento até a geração do resultado final no relatório, foi de aproximadamente 4 minutos. Isso representa uma economia significativa em comparação com o tempo de um usuário experiente, que é em média de 8 minutos, resultando em uma economia de 50 % no tempo de realização dos testes no VibraOne. Quando comparado a um usuário iniciante, com uma média de 16 minutos, a economia de tempo foi de 62 % aproximadamente.

Ao extrapolar para uma escala mais ampla, considerando uma média de 100 placas por lote, o tempo total para os testes analógicos seria de 13 horas e 20 minutos em tempo corrido com a realização de um usuário experiente. No entanto, ao utilizar o software de automação das entradas analógicas, o tempo necessário seria reduzido para 6 horas e 10 minutos. Em outras palavras, em menos de um dia de trabalho, um usuário poderia validar 100 placas VibraOne. Entretanto, mesmo se não houvesse o ganho de tempo como foi obtido, ainda é obtido ganhos qualitativos como o aumento da confiabilidade dos testes removendo a interferência humana aos processos.

Infelizmente, não foi possível observar mais resultados dos testes em dezenas de equipamentos para aprimorar as análises propostas e obter resultados mais consistentes. Isso ocorreu devido à defasagem entre o tempo de desenvolvimento do software e a demanda da empresa para a fabricação dos equipamentos.

Para futuras melhorias, o software poderia oferecer procedimentos adicionais ao usuário para auxiliar na detecção de possíveis problemas no equipamento ou em uma montagem inadequada durante o processo de validação. Há também a necessidade futura, visando economia de tempo, de realizar os testes separadamente para analisar possíveis erros de fabricação na placa, bem como melhorias na qualidade do software em interação com o usuário.



# Referências

AQTECH Power Prognostics. Disponível em: <<https://www.aqtech.com/hidro>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

ARAR, S. *Piezoelectric Accelerometers With Integrated Electronics Piezoelectric (IEPE)*. 2022. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-piezoelectric-accelerometers-with-integral-electronics-piezo-electric-iepe-sensor/>>. Citado na página 29.

CAÚS, A. et al. *Apostila de retificadores*. 2021. Citado na página 30.

CHEIJ, D. A software architecture for building interchangeable test systems. In: *2001 IEEE Autotestcon Proceedings. IEEE Systems Readiness Technology Conference. (Cat. No.01CH37237)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 16–22. Citado na página 27.

DIAS, J. d. S. Procad: programa de cálculo de erro em aquisição digital de sinais. 1994. Citado na página 30.

DOSSI, M.; FORTE, E.; PIPAN, M. Minimum threshold for the sampling rate to prevent amplitude distortions in aliasing-free gpr surveys. In: *2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 30.

GLAUCO, P. *Física Experimental 4 - Osciloscópio*. 2017. Disponível em: <<https://cursos.if.uff.br/!fisexp4-0117/doku.php>>. Citado na página 28.

LATHI, B. *Sinais e Sistemas Lineares - 2.ed.* Bookman, 2006. ISBN 9788577803910. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=S806DQAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

O que é IVI? 2023. Disponível em: <<https://www.ivifoundation.org>>. Citado na página 33.

SILVA, A. S.; TROFINO, A. *Apostila de Principios de sistemas de controle*. 2021. Citado na página 34.

STEVE, G. *Guia da área de trabalho (Windows Forms .NET)*. 2023. Disponível em: <<https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/desktop/winforms/overview/?view=netdesktop-8.0>>. Citado na página 33.

WAGNER, B. *Um tour pela linguagem C#*. 2023. Disponível em: <<https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>>. Citado na página 33.



# Anexos



# ANEXO A – Resultados obtidos no teste 2: $3 V_{ac} + 3 V_{dc}$ . Referentes ao VibraOne 1

O anexo A é referente a bateria de testes do segundo tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1.

Teste 2: 3Vac + 3Vdc em escala de 5V						
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
EA 01	0,0055	0,0553	2,9766	0,0266	8,4355	0,2398
EA 02	0,0046	0,0462	2,9642	0,0972	8,4002	0,1129
EA 03	0,0054	0,0541	2,9718	0,0209	8,4221	0,1061
EA 04	0,0044	0,0441	2,9775	0,0362	8,4394	0,2788
EA 05	0,0041	0,0409	2,9664	0,0752	8,4071	0,0443
EA 06	0,0046	0,0459	2,9748	0,0089	8,4304	0,1889
EA 07	0,0051	0,0514	2,9578	0,1614	8,3828	0,2868
EA 08	0,0050	0,0504	2,9766	0,0270	8,4362	0,2471
EA 09	0,0047	0,0469	2,9731	0,0079	8,4256	0,1415
EA 10	0,0048	0,0477	2,9526	0,2132	8,3672	0,4431
EA 11	0,0042	0,0420	2,9697	0,0419	8,4165	0,0495
EA 12	0,0045	0,0454	2,9780	0,0412	8,4393	0,2782
EA 13	0,0046	0,0460	2,9722	0,0176	8,4224	0,1093
EA 14	0,0040	0,0404	2,9791	0,0518	8,4423	0,3078
EA 15	0,0034	0,0339	2,9666	0,0731	8,4078	0,0374
EA 16	0,0036	0,0359	2,9699	0,0398	8,4169	0,0545
EA 17	0,0033	0,0330	2,9663	0,0760	8,4067	0,0483
EA 18	0,0035	0,0354	2,9820	0,0812	8,4511	0,3956
EA 19	0,0031	0,0314	2,9874	0,1345	8,4671	0,5560
EA 20	0,0037	0,0365	2,9691	0,0482	8,4149	0,0337
EA 21	0,0032	0,0322	2,9617	0,1223	8,3927	0,1883
EA 22	0,0031	0,0309	2,9760	0,0212	8,4334	0,2190
EA 23	0,0023	0,0225	2,9781	0,0417	8,4406	0,2914
EA 24	0,0023	0,0227	2,9732	0,0071	8,4260	0,1454

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO B – Resultados obtidos no teste 2: $3 V_{ac} + 3 V_{dc}$ . Referentes ao VibraOne 2

O anexo B é referente a bateria de testes do segundo tipo de testes no equipamento VibraOne numero 2.

Tabela 4 – Tabela resultados teste 2 VibraOne 2.

	Teste 2: $3V_{ac} + 3V_{dc}$ em escala de 5V					
	Vm	Erro Vm	Vrms	Erro Vrms	Vpp	Erro Vpp
EA 01	0,0005	0,0045	2,9836	0,0966	8,4574	0,4591
EA 02	-0,0003	0,0026	2,9817	0,0775	8,4507	0,3924
EA 03	0,0009	0,0089	2,9784	0,0444	8,4443	0,3278
EA 04	0,0009	0,0093	2,9757	0,0183	8,4360	0,2450
EA 05	0,0004	0,0040	2,9717	0,0219	8,4229	0,1143
EA 06	0,0016	0,0163	2,9779	0,0397	8,4416	0,3011
EA 07	0,0021	0,0213	2,9732	0,0072	8,4315	0,1996
EA 08	0,0020	0,0196	2,9874	0,1351	8,4720	0,6050
EA 09	0,0023	0,0226	2,9562	0,1773	8,3821	0,2940
EA 10	0,0026	0,0263	2,9793	0,0534	8,4491	0,3759
EA 11	0,0022	0,0218	2,9747	0,0082	8,4359	0,2441
EA 12	0,0027	0,0273	2,9602	0,1369	8,3971	0,1440
EA 13	0,0033	0,0330	2,9805	0,0658	8,4555	0,4398
EA 14	0,0023	0,0234	2,9777	0,0383	8,4455	0,3400
EA 15	0,0033	0,0335	2,9708	0,0308	8,4262	0,1475
EA 16	0,0037	0,0374	2,9645	0,0943	8,4086	0,0293
EA 17	0,0041	0,0406	2,9688	0,0514	8,4216	0,1014
EA 18	0,0043	0,0432	2,9670	0,0694	8,4171	0,0556
EA 19	0,0211	0,2114	2,9873	0,1341	8,5067	0,9516
EA 20	0,0044	0,0443	2,9715	0,0246	8,4293	0,1776
EA 21	0,0073	0,0734	2,9588	0,1508	8,3995	0,1201
EA 22	0,0059	0,0589	2,9721	0,0184	8,4340	0,2246
EA 23	0,0106	0,1062	2,9798	0,0592	8,4669	0,5538
EA 24	0,0084	0,0845	2,9439	0,2997	8,3593	0,5215

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO C – Resultados obtidos no teste 3: Corrente. Referentes ao VibraOne 1

O anexo C é referente a bateria de testes do terceiro tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1.

	Teste 3: 3Vac (Corrente)					
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
<b>EA 01</b>	-0,0005	0,0026	0,4074	0,0851	1,1542	0,2303
<b>EA 02</b>	-0,0007	0,0037	0,4055	0,0944	1,1491	0,2561
<b>EA 03</b>	0,0001	0,0007	0,4070	0,0870	1,1538	0,2322
<b>EA 04</b>	-0,0009	0,0047	0,4061	0,0912	1,1524	0,2395
<b>EA 05</b>	-0,0013	0,0066	0,4060	0,0919	1,1516	0,2432
<b>EA 06</b>	-0,0005	0,0023	0,4069	0,0871	1,1533	0,2351
<b>EA 07</b>	0,0004	0,0019	0,4037	0,1035	1,1449	0,2769
<b>EA 08</b>	0,0005	0,0027	0,4065	0,0893	1,1539	0,2321
<b>EA 09</b>	0,0004	0,0020	0,4068	0,0879	1,1543	0,2302
<b>EA 10</b>	0,0003	0,0014	0,4036	0,1038	1,1452	0,2752
<b>EA 11</b>	0,0005	0,0023	0,4059	0,0922	1,1515	0,2437
<b>EA 12</b>	0,0010	0,0052	0,4067	0,0885	1,1550	0,2266
<b>EA 13</b>	0,0009	0,0044	0,4061	0,0914	1,1532	0,2353
<b>EA 14</b>	0,0004	0,0019	0,4084	0,0798	1,1584	0,2092
<b>EA 15</b>	-0,0005	0,0023	0,4060	0,0917	1,1503	0,2497
<b>EA 16</b>	-0,0002	0,0008	0,4060	0,0919	1,1508	0,2474
<b>EA 17</b>	-0,0002	0,0011	0,4045	0,0994	1,1462	0,2704
<b>EA 18</b>	0,0002	0,0010	0,4095	0,0743	1,1617	0,1929
<b>EA 19</b>	-0,0004	0,0020	0,4076	0,0836	1,1549	0,2270
<b>EA 20</b>	0,0007	0,0035	0,4060	0,0920	1,1529	0,2367
<b>EA 21</b>	0,0006	0,0028	0,4048	0,0976	1,1486	0,2583
<b>EA 22</b>	0,0006	0,0028	0,4063	0,0904	1,1527	0,2381
<b>EA 23</b>	-0,0002	0,0011	0,4072	0,0860	1,1539	0,2318
<b>EA 24</b>	-0,0003	0,0015	0,4056	0,0938	1,1497	0,2531

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO D – Resultados obtidos no teste 3: Corrente. Referentes ao VibraOne 2

O anexo D é referente a bateria de testes do terceiro tipo de testes no equipamento VibraOne numero 2.

	Teste 3: 3Vac (Corrente)					
	Vm	Erro Vm	Vrms	Erro Vrms	Vpp	Erro Vpp
<b>EA 01</b>	-0,0004	0,0019	0,4082	0,0810	1,1568	0,2176
<b>EA 02</b>	-0,0008	0,0041	0,4080	0,0818	1,1572	0,2152
<b>EA 03</b>	-0,0004	0,0018	0,4079	0,0822	1,1569	0,2167
<b>EA 04</b>	-0,0003	0,0017	0,4063	0,0906	1,1518	0,2427
<b>EA 05</b>	-0,0015	0,0074	0,4068	0,0880	1,1547	0,2280
<b>EA 06</b>	0,0007	0,0035	0,4078	0,0828	1,1574	0,2143
<b>EA 07</b>	0,0003	0,0016	0,4068	0,0876	1,1545	0,2288
<b>EA 08</b>	0,0003	0,0017	0,4080	0,0820	1,1574	0,2143
<b>EA 09</b>	0,0002	0,0009	0,4046	0,0988	1,1480	0,2614
<b>EA 10</b>	0,0007	0,0035	0,4074	0,0851	1,1568	0,2175
<b>EA 11</b>	-0,0003	0,0016	0,4070	0,0868	1,1538	0,2323
<b>EA 12</b>	0,0004	0,0022	0,4044	0,1000	1,1474	0,2645
<b>EA 13</b>	0,0008	0,0039	0,4069	0,0873	1,1561	0,2211
<b>EA 14</b>	-0,0008	0,0039	0,4085	0,0794	1,1598	0,2025
<b>EA 15</b>	0,0002	0,0012	0,4068	0,0879	1,1541	0,2309
<b>EA 16</b>	0,0010	0,0052	0,4050	0,0967	1,1505	0,2491
<b>EA 17</b>	-0,0001	0,0006	0,4056	0,0937	1,1498	0,2523
<b>EA 18</b>	0,0011	0,0054	0,4049	0,0973	1,1500	0,2514
<b>EA 19</b>	0,0133	0,0666	0,4091	0,0763	1,1861	0,0707
<b>EA 20</b>	-0,0004	0,0022	0,4060	0,0921	1,1505	0,2491
<b>EA 21</b>	0,0006	0,0031	0,4037	0,1033	1,1453	0,2751
<b>EA 22</b>	-0,0003	0,0015	0,4078	0,0827	1,1557	0,2230
<b>EA 23</b>	-0,0001	0,0005	0,4066	0,0888	1,1529	0,2370
<b>EA 24</b>	0,0006	0,0032	0,4038	0,1026	1,1460	0,2713

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO E – Resultados obtidos no teste 4: IEPE. Referentes aos VibraOnes 1 e 2

O anexo E é referente a bateria de testes do quarto tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1 e VibraOne numero 2.

	Teste 4: IEPE VibraOne 1		Teste 4: IEPE VibraOne 2	
	Im (mA)	Irms (mA)	Im (mA)	Irms (mA)
EA 01	12,2154	12,2154	12,2736	12,2736
EA 02	10,9934	10,9934	11,5436	11,5436
EA 03	12,2171	12,2171	11,9565	11,9565
EA 04	11,4373	11,4373	11,0493	11,0493
EA 05	11,9680	11,9680	11,8335	11,8335
EA 06	11,9129	11,9129	11,4655	11,4655
EA 07	12,1692	12,1692	11,9206	11,9206
EA 08	12,4350	12,4350	11,9612	11,9612
EA 09	12,1868	12,1868	10,6179	10,6179
EA 10	11,5508	11,5508	12,2848	12,2848
EA 11	11,6364	11,6364	11,9759	11,9759
EA 12	12,0083	12,0083	11,0489	11,0489
EA 13	10,3687	10,3687	11,1525	11,1525
EA 14	11,2135	11,2135	12,2112	12,2112
EA 15	11,8578	11,8578	11,5556	11,5556
EA 16	11,4889	11,4889	12,0518	12,0518
EA 17	11,9504	11,9504	12,1130	12,1130
EA 18	10,8329	10,8329	11,8233	11,8233
EA 19	10,9329	10,9329	12,4103	12,4103
EA 20	12,1623	12,1623	12,4880	12,4880
EA 21	11,7602	11,7602	10,8318	10,8318
EA 22	11,3186	11,3186	11,5746	11,5746
EA 23	11,4075	11,4075	10,9999	10,9999
EA 24	11,2051	11,2051	11,7896	11,7896

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO F – Resultados obtidos aplicando configurações erradas no Teste 2: $3 V_{ac} + 3 V_{dc}$ . Referentes ao VibraOne 1

O anexo F é referente a bateria de testes do segundo tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1. Realizado configurações de entrada propositalmente erradas.

	Teste 2: $3V_{ac} + 3V_{dc}$ em escala de 5V					
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
EA 01	0,0000	0,0004	2,9777	0,0381	8,4385	0,2696
EA 02	-0,0005	0,0047	2,9652	0,0868	8,4043	0,0717
EA 03	0,0004	0,0041	2,9733	0,0065	8,4260	0,1454
EA 04	-0,0004	0,0043	2,9788	0,0488	8,4431	0,3165
EA 05	-0,0007	0,0075	2,9676	0,0631	8,4110	0,0055
EA 06	0,0000	0,0003	2,9762	0,0231	8,4344	0,2292
EA 07	0,0006	0,0055	2,9590	0,1496	8,3869	0,2461
EA 08	0,0007	0,0071	2,9778	0,0387	8,4390	0,2751
EA 09	-0,0003	0,0026	2,9740	0,0004	8,4277	0,1617
EA 10	0,0014	0,0143	2,9536	0,2035	8,3695	0,4202
EA 11	0,0005	0,0047	2,9706	0,0331	8,4180	0,0651
EA 12	0,0009	0,0086	2,9790	0,0512	8,4427	0,3120
EA 13	0,0003	0,0033	2,9730	0,0087	8,4253	0,1382
EA 14	0,0006	0,0065	2,9801	0,0624	8,4451	0,3365
EA 15	-0,0002	0,0023	2,9674	0,0656	8,4094	0,0215
EA 16	0,0002	0,0023	2,9708	0,0311	8,4189	0,0743
EA 17	-0,0001	0,0009	2,9669	0,0697	8,4072	0,0431
EA 18	0,0003	0,0029	2,9829	0,0902	8,4527	0,4124
EA 19	2,5405	25,4053	2,4374	5,3651	7,5031	9,0842
EA 20	0,0004	0,0043	2,9700	0,0395	8,4157	0,0420
EA 21	0,0003	0,0025	2,9625	0,1145	8,3945	0,1697
EA 22	0,0004	0,0035	2,9769	0,0301	8,4361	0,2457
EA 23	-0,0003	0,0026	2,9787	0,0479	8,4425	0,3101
EA 24	-0,0003	0,0029	0,4775	24,9643	1,3543	70,5718

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO G – Resultados obtidos aplicado configurações erradas no Teste 3: Corrente. Referentes ao VibraOne 1

O anexo G é referente a bateria de testes do terceiro tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1. Realizado configurações de entrada propositalmente erradas.

	Teste 3: Corrente					
	Vm (V)	Erro (%)	Vrms (V)	Erro (%)	Vpp (V)	Erro (%)
EA 01	-0,0005	0,0026	0,4113	0,0655	1,1655	0,1741
EA 02	1,0862	5,4309	3,0731	13,2439	10,1912	44,9547
EA 03	0,0002	0,0009	0,4109	0,0674	1,1647	0,1780
EA 04	-0,0009	0,0045	0,4101	0,0715	1,1628	0,1874
EA 05	-0,0012	0,0062	0,4058	0,0930	1,1493	0,2548
EA 06	-0,0007	0,0034	0,4107	0,0682	1,1641	0,1808
EA 07	0,0004	0,0020	0,0650	1,7967	0,1863	5,0699
EA 08	1,0905	5,4527	3,0842	13,2992	10,1921	44,9589
EA 09	0,0004	0,0021	0,4107	0,0686	1,1651	0,1759
EA 10	0,0003	0,0016	0,4075	0,0846	1,1561	0,2210
EA 11	0,0005	0,0026	0,4098	0,0727	1,1625	0,1889
EA 12	0,0011	0,0055	0,4106	0,0689	1,1660	0,1715
EA 13	0,0009	0,0044	0,4099	0,0721	1,1638	0,1822
EA 14	-0,0014	0,0071	2,8861	12,3087	8,1876	34,9366
EA 15	-0,0004	0,0021	0,4099	0,0725	1,1615	0,1942
EA 16	-0,0001	0,0006	0,4098	0,0726	1,1616	0,1934
EA 17	-0,0002	0,0009	0,4083	0,0802	1,1569	0,2170
EA 18	-0,0002	0,0008	0,4133	0,0555	1,1714	0,1445
EA 19	-0,0003	0,0017	0,4116	0,0640	1,1659	0,1719
EA 20	0,0007	0,0035	0,4099	0,0725	1,1630	0,1866
EA 21	0,0006	0,0029	0,4087	0,0783	1,1593	0,2052
EA 22	0,0006	0,0032	0,4102	0,0709	1,1638	0,1826
EA 23	-0,0002	0,0012	0,4111	0,0665	1,1652	0,1753
EA 24	-0,0003	0,0015	0,4094	0,0746	1,1607	0,1979

Fonte: Autoria Própria.



# ANEXO H – Resultados obtidos aplicado configurações erradas no Teste 4: IEPE. Referentes ao VibraOne 1

O anexo H é referente a bateria de testes do quarto tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1. Realizado configurações de entrada propositalmente erradas nas duas primeiras colunas. As demais colunas é referente aos testes do quarto tipo de testes no equipamento VibraOne numero 1 aplicado corretamente as configurações.

	Teste 4: IEPE com erro aplicado		Teste 4: IEPE sem erro aplicado	
	Im (mA)	Irms (mA)	Im (mA)	Irms (mA)
EA 01	0,1760	0,1790	12,2154	12,2154
EA 02	12,0702	12,0702	10,9934	10,9934
EA 03	11,4960	11,4960	12,2171	12,2171
EA 04	12,5251	12,5251	11,4373	11,4373
EA 05	11,1014	11,1014	11,9680	11,9680
EA 06	13,0011	13,0011	11,9129	11,9129
EA 07	11,2730	11,2730	12,1692	12,1692
EA 08	13,5323	13,5323	12,4350	12,4350
EA 09	11,4617	11,4617	12,1868	12,1868
EA 10	0,0025	0,0030	11,5508	11,5508
EA 11	10,7268	10,7268	11,6364	11,6364
EA 12	13,1529	13,1529	12,0083	12,0083
EA 13	9,5184	9,5184	10,3687	10,3687
EA 14	12,3874	12,3874	11,2135	11,2135
EA 15	2,9367	2,9367	11,8578	11,8578
EA 16	12,7013	12,7013	11,4889	11,4889
EA 17	11,2718	11,2718	11,9504	11,9504
EA 18	12,0297	12,0297	10,8329	10,8329
EA 19	10,0914	10,0914	10,9329	10,9329
EA 20	13,3499	13,3499	12,1623	12,1623
EA 21	30,9240	30,9240	11,7602	11,7602
EA 22	12,5587	12,5587	11,3186	11,3186
EA 23	10,6563	10,6563	11,4075	11,4075
EA 24	12,4383	12,4383	11,2051	11,2051

Fonte: Autoria Própria.