



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

SILAS BARROSO SCHIMITH

**VIBRÓGRAFO AUTÔNOMO PARA AQUISIÇÃO
REMOTA DE DADOS DE VIBRAÇÕESEÓLICAS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO ELÉTRICAS SUSPENSAS**

SILAS BARROSO SCHIMITH

**VIBRÓGRAFO AUTÔNOMO PARA AQUISIÇÃO
REMOTA DE DADOS DE VIBRAÇÕES EÓLICAS DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO ELÉTRICAS SUSPENSAS**

Dissertação de Mestrado submetido à
Universidade Estadual de Londrina como
parte dos requisitos para a obtenção do
grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. José Alexandre de França.

Londrina
2012

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca
Central da Universidade Estadual de Londrina**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S335v Schimith, Silas Barroso.

Vibrógrafo autônomo para aquisição remota de dados de vibrações eólicas de linhas de transmissão elétricas suspensas / Silas Barroso Schimith. – Londrina, 2012.

70 f. : il.

Orientador: José Alexandre de França.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia.

1. Aquisição de dados. 2. Vibração eólica. 3. Linhas elétricas. 4. Engenharia elétrica. I. França, José Alexandre de. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.372.2

SILAS BARROSO SCHIMITH

**VIBRÓGRAFO AUTÔNOMO PARA AQUISIÇÃO
REMOTA DE DADOS DE VIBRAÇÕES E SÉLICAS
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ELÉTRICAS
SUSPENSAS**

Dissertação de mestrado submetido à
Universidade Estadual de Londrina como
parte dos requisitos para a obtenção do
grau de mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Dr. José Alexandre de França
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda
Universidade Federal do Rio Grande do
Norte – UFRGN

Dr. Newton Silva
Universidade de Campinas – UNICAMP

Londrina, 14 de dezembro de 2012.

À minha esposa, Sani, e aos meus filhos, André, Caroline e Lucas, que abriram mão de valioso tempo familiar durante a etapa de esforços e dedicação para atingir esse grande objetivo. Aos meus pais que me ensinaram, instruíram e praticaram desde o início da vida que a fé e a esperança dão energia a perseverança, a qual sustenta a nossa vida. A todos os meus mestres, colaboradores e amigos que apoiaram nas horas difíceis.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e saúde, e pela esperança de paz, justiça e alegria. Por essa fé, também agradeço a todos que Ele tem apresentado em minha vida: familiares, mestres e amigos.

Aos meus mestres e todos colaboradores do Laboratório de Instrumentação e Automação Inteligente e de todo o Departamento de Engenharia Elétrica da UEL, especialmente aos professores José Alexandre e Maria Bernadete de França e aos demais professores, colegas, técnicos dos laboratórios, estagiários e demais envolvidos, incluindo os co-autores dos artigos publicados e aos colegas Alex Guedes Lemes, Maurício Moreira, Airá Simões e Etiene Cristina P. da Silva, Lucas de Souza Ribeiro e demais colegas que auxiliaram em alguma etapa de hardware ou software nas diversas fases do projeto.

Ao apoio do CNPq e Fundação Araucária pelos recursos para pesquisa.

A equipe da Eletrosul - Divisão Regional do Paraná, através da disponibilização de suas linhas de transmissão entre Londrina (PR) e Ivaiporã (PR) para testes experimentais entre 2010 e 2012, e pela prestatividade dos colaboradores Fernando Teodoro e Geneçí Antonio de Araújo no auxílio às instalações em campo.

A todas instituições, departamentos e seções direta ou indiretamente envolvidos.

Resumo da dissertação apresentada à UEL como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

SCHIMITH, Silas Barroso. **Vibrógrafo autônomo para aquisição remota de dados de vibrações eólicas de linhas de transmissão elétricas suspensas**. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

RESUMO

Projeto e implementação de um Vibrógrafo para monitorar vibrações com a finalidade de obter o impacto incremental da fadiga causada por vibrações eólicas em linhas de transmissão elétrica suspensas sobre a degradação do tempo de vida útil de um cabo. O equipamento consiste em um detector de vibrações que coleta os dados conforme a padronização de medições de vibração de condutores estabelecida pela norma "Standardization of Conductor Vibration Measurements" (IEEE, 1966), utilizando extensômetro como sensor de vibrações para coleta da amplitude máxima de pico a pico das oscilações e da frequência de vibração em um intervalo de um segundo. A alimentação do conjunto provém de uma bateria interna que é recarregada por um painel solar fotovoltaico. As tabelas dos dados coletados são transmitidas diariamente através de modem GPRS para uma central de processamento remoto.

Palavras-chave: Aquisição remota de dados. Extensômetro. Fadiga. Energia solar fotovoltaica. Transmissão modem GPRS.

SCHIMITH, Silas Barroso. V **Unattended vibrograph for suspended electric transmission line aeolian vibration remote data acquisition**. 2012. 70 f. Dissertation (Master's Degree in Electrical Engineering) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

ABSTRACT

Project and implementation of an unattended Vibration Detector to monitor transmission line vibrations in order to obtain the incremental impact of fatigue caused by aeolian vibrations in suspended electric transmission lines over the cable life time degradation. The equipment implements data acquisition according to Standardization of Conductor Vibration Measurements (IEEE, 1966), using strain gauges to detect vibrations, measure the maximum peak-to-peak bending amplitude and the vibration frequency during the sampling period of one second. The energy is provided by an internal battery, which is charged by a photovoltaic solar panel. The collected data table is transmitted daily through a GPRS modem to a remote processing data base.

Keywords: Remote data acquisition. Strain gauge. Fatigue. Photovoltaic solar energy. GPRS transmission modem.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Torres de Linhas de Transmissão - Hiroshima, Japão | 19 |
| Figura 2.2 – Condutores energizados (na estrutura inferior) e cabos protetores pára-raios (nas pontas superiores) em detalhes de torre de linhas de transmissão da Eletrosul-Linha Londrina/Ivaiporã - Paraná - Brasil | 20 |
| Figura 2.3 – SIN - Integração das Bacias | 21 |
| Figura 2.4 – Cabo condutor apresenta falha por fadiga | 23 |
| Figura 2.5 – Ruptura de um dos fios condutores de um cabo | 24 |
| Figura 2.6 – Amortecedor de vibração do tipo Stockbridge | 25 |
| Figura 2.7 – Amortecedor do tipo preformado envolvente ao cabo..... | 25 |
| Figura 2.8 – Torres caídas de linhas de transmissão | 26 |
| Figura 2.9 – A estatal Furnas Centrais Elétricas anunciou em 18/08/2010 que instalou os reforços nas 70 torres de transmissão da linha de transmissão que sai da hidrelétrica de Itaipu, em Foz do Iguaçu (PR), e chega à subestação de Ivaiporã (PR), linha que ocasionou falha de energia (“apagão”)..... | 26 |
| Figura 3.1 – Esquema de montagem da haste (Protótipo Funcional)..... | 31 |
| Figura 3.2 – Diagrama de blocos | 31 |
| Figura 3.3 – Sensor e condicionamento do sinal..... | 33 |
| Figura 3.4 – Regulagem da Ponte de Wheatstone | 34 |
| Figura 3.5 – Esboço do sistema de aquisição de dados distribuído desenvolvido | 38 |
| Figura 3.6 – Esboço do vibrógrafo desenvolvido. A ponta da haste transdutora toca o cabo a 89 mm do ponto médio do suporte, pois a vibração deve ser medida a esta distância do ponto de fixação do cabo na torre | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7 – Circuito de condicionamento que adéqua o sinal de tensão do transdutor ao conversor A/D utilizado para digitalização. Todos os amplificadores operacionais são OPA4830 | 40 |
| Figura 3.8 – Diagrama de blocos do módulo de aquisição desenvolvido. A interface USB é utilizada apenas para depuração | 41 |
| Figura 3.9 – Visão superior mostrando painel solar e antena - Protótipo Final | 43 |
| Figura 3.10 – Máquina de estados do módulo de aquisição | 45 |
| Figura 3.11 – Diagrama Esquemático do vibrógrafo - Protótipo Final..... | 48 |
| Figura 3.12 – Conectores de Energia, Tensão de Entrada VB..... | 49 |
| Figura 3.13 – Regulador LP2981 - Tensão de 3,30 Volts para Microcontrolador | 49 |
| Figura 3.14 – Regulador ADP3334 - Tensão de 4,20 Volts para MO-DEM..... | 49 |
| Figura 3.15 – Microprocessador HC08 e suas conexões..... | 50 |
| Figura 3.16 – Sensores, Amplificação pelo INA125, Off-set (RV1), Ajuste do Ganho (Calibração por RV2) e Filtro..... | 50 |
| Figura 3.17 – Conexões do MODEM GPRS..... | 51 |
| Figura 3.18 – LED tricolor do Microcontrolador e Circuito auxiliar para PW..... | 52 |
| Figura 3.19 – PCB - Lado dos Componentes | 52 |
| Figura 3.20 – PCB - Lado da Solda..... | 53 |
| Figura 4.1 – Ampliação do deslocamento..... | 55 |
| Figura 4.2 – Curva de transferência para verificação da linearidade das 3 séries de medidas..... | 56 |
| Figura 4.3 – Composição de Senos: uma das diversas curvas usadas para validação dos algoritmos..... | 56 |
| Figura 4.4 – Sinal de pêndulo oscilante..... | 57 |
| Figura 4.5 – Montagem do vibrógrafo | 58 |
| Figura 4.6 – Montagem do painel solar..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 – Montagem do vibrógrafo (Protótipo Final) | 60 |
| Figura 4.8 – Visualização do “jig”: os locais onde se posiciona a haste sensora para a calibração são representados pelas letras a, b, c, d, e, segundo seus diâmetros | 61 |
| Figura 4.9 – Amplitude máxima por intervalo de frequência | 63 |
| Figura 4.10 – Distribuição por frequência | 63 |
| Figura 4.11 – Vibração Cumulativa | 64 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Descrição dos estados do módulo de aquisição..... | 46 |
| Tabela 4.1 - 5 Pontos de Calibração para obter os deslocamentos de referência usando o “jig” | 61 |
| Tabela 4.2 - Dados de vibração transmitidos: Cada entrada corresponde à contagem de um evento de vibração para a amplitude e frequência determinadas. Dados obtidos na Linha Eletrosul-Ivaiporã - Londrina II, Torre 115-2, Vão Gravante 660m., Cabo para-raios, lado leste - Período: 30/05/1112:15a31/05/1112:00 | 62 |

Conteúdo

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... | 13 |
| CAPÍTULO 2 – FUNDAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 Um pouco de história | 17 |
| 2.2 Importância da Confiabilidade do Sistema Elétrico | 19 |
| 2.3 SIN - Sistema Interligado Nacional - Brasil..... | 21 |
| 2.4 Como Aparecem as Vibrações Eólicas | 22 |
| 2.5 Vibrações Galopantes não serão abordadas | 22 |
| 2.6 Projetos de Linha de Transmissão e Otimização de Amortecedores . | 23 |
| 2.7 Detecções Referenciais com Extensômetros | 25 |
| 2.8 Outros Detectores de Vibração..... | 27 |
| 2.9 Metodologia de Análise..... | 28 |
| CAPÍTULO 3 – PROJETO E IMPLANTAÇÃO DO VIBRÓGRAFO..... | 30 |
| 3.1 Planejamento e Montagem do Protótipo..... | 30 |
| 3.1.1 Entrada do Sinal..... | 32 |
| 3.1.2 Sensor Extensômetro ou “Strain Gauge” | 33 |
| 3.1.3 Ponte de Wheatstone..... | 33 |
| 3.1.4 Amplificador Operacional e Filtragem | 35 |
| 3.1.5 Ajustes Iniciais..... | 35 |
| 3.1.6 Taxa de Amostragem..... | 35 |
| 3.1.7 Tratamento dos Dados..... | 36 |
| 3.1.8 Valor Médio ou Ponto de Repouso da Haste | 36 |
| 3.1.9 Cálculo da Frequência a partir dom Meio-Período | 37 |
| 3.1.10 Amplitude do Sinal..... | 37 |
| 3.1.11 Reset do Sistema | 37 |
| 3.2 Detalhes e Aperfeiçoamento do Protótipo Final..... | 37 |
| 3.2.1 Sistema de Redes de Vibrógrafos..... | 38 |

| | | |
|-------------------------------|---|----|
| 3.2.2 | Medição da Vibração | 39 |
| 3.2.3 | Módulo de Aquisição..... | 41 |
| 3.2.4 | Transmissão dos Dados..... | 41 |
| 3.2.5 | Sincronização de Tempo | 42 |
| 3.2.6 | Características de Consumo..... | 42 |
| 3.2.7 | Interface com o Computador..... | 43 |
| 3.2.8 | <i>Software</i> de Gerenciamento | 44 |
| 3.2.9 | Servidor de Dados | 44 |
| 3.2.10 | Recepção dos Dados..... | 45 |
| 3.2.11 | Processamento dos Dados..... | 46 |
| 3.2.12 | Registro de Eventos..... | 47 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS | | 54 |
| 4.1 | Testes com o Protótipo Funcional..... | 54 |
| 4.1.1 | Verificação da Linearidade da Curva de Transferência..... | 54 |
| 4.1.2 | Validação da Frequência | 55 |
| 4.1.3 | Funcionamento em Laboratório..... | 57 |
| 4.1.4 | Montagens em Campo | 58 |
| 4.2 | Resultados com o Protótipo Final | 59 |
| 4.2.1 | Validação da Amplitude | 60 |
| 4.2.2 | Instalação em Campo | 61 |
| 4.2.3 | Processamento dos Dados..... | 62 |
| 4.2.4 | Validações Complementares | 64 |
| 4.2.5 | Pesquisas e Futuras Implementações | 64 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES | | 66 |
| Bibliografia | | 67 |

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia e o aumento da implantação de fontes renováveis de energia no mundo todo, têm requerido um aumento de capacidade de transmissão elétrica demandando novas linhas ou o aumento da capacidade das linhas existentes (Cloet e Lilien, 2011).

Estas linhas estão sujeitas a vibrações eólicas que causam fadiga (Azevedo et al., 2009) principalmente próximos aos engastes rígidos do cabo no suporte das torres, que pode levar à ruptura, com danos sub-sequentes nos amortecedores, armaduras pré-formadas e partes da torre (Rolim, 2009).

Esta última autora (Rolim, 2009) também salienta que a ruptura de um cabo pode gerar um efeito cascata no sistema elétrico (“apagão”), como aconteceu na queda de cabo da CESP (Companhia Energética de São Paulo) em 2002, que deixou a Região Sudeste do Brasil sem energia durante quatro horas, afetando cerca de 67 milhões de habitantes. Segundo Azevedo et al. (2009), investigações indicaram que a ruptura dos fios teria ocorrido sob regime de abrasão por deslizamento induzido pela oscilação dos sub-condutores. Mourão (2005) também informou que as análises deste caso comprovaram que o aumento súbito de carga transformou um ponto de defeito em ponto de falha e a ruptura provocou a pane em todo sistema interligado. Esse autor também observa que, na maioria das ocorrências analisadas envolvendo o rompimento de cabos como causa primária de falha, os efeitos mecânicos da vibração formaram pontos restritivos devido à fadiga que geraram um efeito térmico associado, este proveniente da alta corrente elétrica, levando à ruptura.

Para reduzir essas vibrações causadas pelos ventos, utiliza-se a instalação de amortecedores de vibração dimensionados conforme o tipo e diâmetro do condutor, da tensão de esticamento a que este fica submetido e ao vão entre duas torres subsequentes. A instalação desses amortecedores foi padronizada (Koepfinger, 1980) e diversos artigos publicados a respeito (Richardson, 1995) (Schmidt et al., 1997), além das propagandas comerciais feitas pelos fabricantes na tentativa de vendê-los (Hubbell, 2006) (PLP, 2006). Contudo, sempre existe o compromisso entre o custo e o benefício de qualquer equipamento e, por isso, surge também a necessidade de estimativa preliminar das vibrações com o objetivo de otimização desses amortecedores (Krispin et al., 2007).

A monitoração das vibrações é a técnica de análise preditiva mais factível e econômica usada em manutenções e fonte de dados para os projetos de linhas, por permitir otimizar os amortecedores de vibração e reduzir os custos, focalizando maior atenção nas regiões de maior vibração. O ponto mais propenso a fadiga se localiza onde o comportamento dinâmico é restringido junto aos grampos de suspensão, espaçadores e amortecedores, onde é necessária rigidez estrutural na direção vertical para suportar o peso do cabo (Rawlins, 1997).

A medição das vibrações eólicas de condutores suspensos foi padronizada pelo Comitê IEEE (1966), estabelecendo que a amplitude de deslocamento deveria ser a grandeza monitorada, ao invés de qualquer outro parâmetro de deslocamento, ângulo ou curvatura. A amplitude de deslocamento foi definida como o deslocamento vertical de pico a pico do condutor medida a 89 mm (3,5 polegadas) de seu último ponto de contato com o grampo de sustentação, tomando este grampo como referencial. Essa padronização foi adotada a partir dos procedimentos de monitoração descritos por Tebo (1941) e tem sido usado como referência na maioria das pesquisas sobre o assunto. Teoricamente este conceito é válido somente para medições junto a grampos de suspensão rígidos, que restringem o movimento do cabo, e não se aplica para casos de conectores flexíveis ou móveis, nem mesmo quando existem armaduras, espaçadores ou amortecedores pré-formados. As monitorações sob estas condições diferentes das previstas são efetuadas somente para fins qualitativos pois seus resultados numéricos divergem dos valores esperados e são de difícil interpretação.

A amplitude e frequência das vibrações são monitoradas com o auxílio de vibrógrafos. Várias soluções têm surgido na tentativa de aperfeiçoar as monitorações e suprir deficiências dos primeiros vibrógrafos, embora estes tenham colaborado para firmar os padrões de medição iniciais. O equipamento mais usado atualmente é o vibrógrafo Pavica, da empresa RocTest Ltd. (RocTest, 2005), que monitora a oscilação através de extensômetro segundo o referido padrão (IEEE, 1966).

Nos últimos anos surgiram diversos artigos e propostas de evolução sobre o tema. Pan e Xiao (2009) propuseram reconhecimento de imagem como ferramenta para detectar a amplitude da oscilação, acompanhando os deslocamentos em relação ao grampo de sustentação do cabo, tendo como diferencial o fato de não necessitar de peças móveis no processo de detecção, enquanto que Hong-Wei e He (2010) propuseram detecção similar de deslocamento, mas com o diferencial do uso do método de visão binocular, que permite a noção adicional da profundidade e distância do objeto. Já Nogueira et al. (2006) e Guo-hua et al. (2011) implementaram o uso de acelerômetro na detecção do movimento, que tem a vantagem de dispensar o uso de referenciais secundários, mas a desvantagem de não ser capaz de diferenciar a oscilação do cabo e do próprio suporte e, caso o suporte esteja vibrando junto, as medições serão superdimensionadas. O uso de detectores do tipo inerciais como acelerômetros e giroscópios não era muito utilizado até então devido ao deslocamento acumulado (“drift”) quando da integração dupla da aceleração para obter a amplitude, o que sempre requeria a correção periódica do erro com o auxílio de um segundo referencial. Uma solução para o caso foi proposta por Tan et al. (2008), que apresentou um método de estimativa de deslocamento para movimentos periódicos usando esses sensores inerciais, através do uso de componentes de Fourier modelados por algoritmo adaptativo, onde o deslocamento é obtido pela integração analítica do modelo de movimento, livrando-se desse erro de deslocamento acumulado (“drift”).

Houve também a proposta de transmissão de imagens filmadas por robôs móveis, que implementa uma solução facilitadora de acesso aplicável em combinação com diversos métodos e propostas já existentes (Zhao et al., 2011), e até sistemas mais complexos de detecção contínua, em tempo real, e que inclui transmissão remota, mas cujo aparato de detecção é grande e exige uma logística um pouco complexa de instalação (Godard et al., 2011). Paralelamente também surgiram estudos, análises e algoritmos de software como: tese de doutorado usando modelos lineares e não lineares, modelamento útil para futuras análises e evoluções no tema (de Souza Junior, 2010), e também uma dissertação de mestrado com estudo abrangente sobre as vibrações e as tensões mecânicas induzidas, como fonte de conhecimentos sobre causas e efeitos das vibrações (Rolim, 2009). Foi introduzida uma solução de eficiência no algoritmo de análises aplicada ao software utilizado pelo EPRI (Lu e Chan, 2007), e publicados estudos complementares sobre o comportamento dinâmico nas vibrações eólicas, que também auxilia na compreensão de suas causas (Diana et al., 2005), e diversos outros trabalhos.

A maioria dos vibrógrafos implementados apresenta alguma deficiência, como a baixa autonomia na alimentação, o que impede a aquisição contínua de dados durante vários meses, por exemplo através das várias estações do ano. Essa deficiência é superada pelos vibrógrafos que independem de troca de baterias ou que possuem um suprimento constante de energia. A falta de praticidade pela necessidade de remoção do equipamento para recuperação dos dados é outra deficiência comum aos projetos pois isso normalmente requer o processamento por etapas: a primeira em campo, com a coleta dos dados, a segunda em um laboratório para resgate e análise de dados. O conhecimento dos dados somente depois de longos períodos, após a desinstalação, dificulta a análise da relação das vibrações com os eventos climáticos do momento. Além disso, uma segunda instalação dificilmente será feita sob as mesmas condições que a primeira, o que dificulta as comparações entre as medições. Isso pode ser resolvido com o envio remoto dos dados diretamente para uma central de processamento.

Para sanar essas dificuldades e introduzir outras melhorias, propõe-se neste trabalho o projeto e montagem de um vibrógrafo pequeno, leve, prático e funcional para uso em campo, fácil de segurar e instalar. Pretende-se que o instalador consiga segurar o equipamento com uma mão e apertar um único parafuso de fixação com auxílio de uma chave na outra mão. Outros objetivos de projeto incluem: baixo custo de fabricação, operação e manutenção, autonomia pela captação de energia solar fotovoltaica, recarga de sua bateria interna, e capacidade de transmissão diária de dados por rede celular GPRS. Essas características diferenciais oferecem vantagens em relação aos equipamentos atualmente existentes no mercado, com grandes benefícios aos usuários que passam a dispor de maior acesso e praticidade de uso em um equipamento de muita utilidade para projetos, manutenção preventiva e corretiva de linhas de transmissão.

Neste Capítulo 1 foi feita uma breve introdução sobre detectores de vibrações eólicas, sua importância e redução de custos de manutenção que se pode obter com sua aplicação, o estado da arte das pesquisas relacionadas com o tema, os principais problemas dos vibrógrafos atualmente existentes no mercado e a proposta de implementação inovadora que se pretende como meta para este trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a base teórica do trabalho. Os fundamentos das vibrações eólicas das linhas de transmissão, as metodologias utilizadas para detecção dessas, os conceitos e equações

que permitem a obtenção dos resultados a partir dos dados disponíveis e a apresentação das relações entre todos parâmetros envolvidos.

No Capítulo 3 são apresentadas as bases para o projeto, o projeto em si e a implementação dos equipamentos: um protótipo funcional onde se testou e validou individualmente os conceitos de cada etapa, e um protótipo final onde todas partes foram integradas, miniaturizadas e montadas em sua configuração proposta final.

No Capítulo 4 são apresentados os equipamentos projetados e implementados. A implementação dos equipamentos já é apresentada como um dos resultados em cada etapa, tanto na etapa de protótipo funcional como na etapa de protótipo final. Os dados coletados com os equipamentos são validados quanto às leituras de amplitude e frequência, e também são apresentados resultados práticos de dados obtidos utilizando os equipamentos implementados.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados e a conclusão que se permite obter com as implementações propostas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Um pouco de história

A eletricidade acompanha o homem desde os primórdios da antiguidade (Ronan, 1987) na forma de descargas elétricas atmosféricas ou outras eletrificações por atrito. Sem desmerecer a curiosidade e inventividade de outras gerações dentre nossos ancestrais ou mesmo de comunidades ou civilizações isoladas, pouco se sabe sobre o conhecimento ou domínio da eletricidade pelos mesmos devido à falta de documentação e registros descritivos. As características evolutivas das conquistas do conhecimento humano permitem inferir que o domínio da eletricidade como conhecemos hoje é algo recente: sua compreensão, geração controlada, sua disponibilidade regular e seu uso sistemático são conhecimentos que o homem dominou somente nos últimos séculos, embora com muita evolução ainda por vir principalmente devido à importância da energia nos dias de hoje.

As primeiras descrições de observações elétricas de que se tem notícia foram registradas pelo filósofo grego Tales de Mileto (dos Anjos, 2012), quando este esfregou um pedaço de âmbar com pele de carneiro e descreveu a posterior atração deste âmbar por pedaços de palha e fragmentos de madeira. Por utilizar um pedaço de âmbar, uma resina fossilizada que em grego se denomina “*élektron*”, a experiência deu origem ao nome da “eletricidade”. Outras contribuições e experiências ocorreram desde então, mas poucas deram origem a linhas de raciocínio e pesquisa perseverante durante muitos séculos.

No século XVII já existiam teorias sobre cargas elétricas quando se iniciaram estudos sistemáticos sobre a eletrificação por atrito (Ronan, 1987). Em 1672 Otto von Guericke inventou uma máquina geradora de cargas elétricas onde uma esfera de enxofre girava constantemente atritando-se em terra seca. Décadas depois, em 1730, Stephen Gray mostrou a distinção entre condutores e isolantes de cargas elétricas sugerindo a idéia de um fluido elétrico que podia ser transferido entre os corpos. Em 1733 o químico Francês Charles Dufay descreveu dois tipos de eletricidade como “resinosa” e “vítrea”, fomentando a hipótese da existência de fluidos elétricos.

Em 1750 Benjamin Franklin propôs a teoria do fluido único, gerando os termos positivo e negativo na eletricidade. Franklin somou suas teorias a invenções já existentes e deu origem ao pára-raios. Neste mesmo século Luigi Aloisio Galvani mostrou uma experiência em que potenciais elétricos produziam contrações na perna de uma rã morta. Alessandro Volta refez a experiência sob diversas outras condições e, em 1800 inventou a “Pilha Voltaica” usando uma série de discos de cobre e zinco alternados, separados por pedaços de papelão embebidos em água salgada. Cada historiador pode analisar essa sequência de eventos evolutivos sob um ponto de vista diferente, mas não se pode negar que essa pilha inventada por Volta foi um grande marco no domínio da eletricidade, e que este abriu campo para muitos outros estudos e análises para a geração e uso controlado da energia elétrica (Vilela, 2012).

A partir da pilha de Alessandro Volta, nas primeiras décadas do século XIX houve grande evolução da eletroquímica. As experiências com correntes elétricas permitiram que Hans Christian Orsted fizesse a ligação entre magnetismo e eletricidade (Wikipedia, 2012). Em 1831, Michael Faraday descobre que a variação na intensidade da corrente elétrica que percorre um circuito fechado induz uma corrente elétrica em uma bobina próxima, e que uma corrente induzida também é observada ao introduzir um ímã nessa bobina. Deste modo inventou o motor elétrico, o dínamo e o transformador, dominando outro modo de geração de correntes elétricas além da eletroquímica, e permitindo a transformação de movimento (ou trabalho) em energia elétrica.

No século XIX também houve a evolução da lâmpada incandescente desde 1802, quando Humphry Davy construiu a primeira fonte luminosa com um filamento de platina, até 1879, quando Thomas Alva Edison construiu a primeira lâmpada incandescente comercializável. Unindo os conhecimentos de geração e uso da eletricidade, estas foram utilizadas inicialmente para iluminação. Em 1886 foi instalada a primeira hidrelétrica junto às Cataratas do Niágara. Nessa época já se estudava usos comparativos de corrente contínua e corrente alternada tanto na geração como no consumo, mas o primeiro motor de corrente alternada foi construído por Nikola Tesla em 1892 e vendido para a Westinghouse (Childress, 2004).

A partir de então, foram feitas máquinas a vapor (termodinâmicas) para movimentar os geradores, aumentando as opções de transformação de combustão em trabalho mecânico, e este em energia elétrica e, no sentido reverso, recuperando trabalho a partir da energia elétrica.

As usinas de produção e os centros consumidores domésticos ou industriais nem sempre estão confinados em um só local ou região. Com a intenção de levar a energia produzida aos consumidores, foram instaladas as linhas de transmissão e distribuição. As linhas de transmissão aéreas são suspensas por altas torres por motivos de segurança. Veja exemplos de fotos nas Figuras 2.1 e 2.2.

As linhas de transmissão em si atualmente utilizam condutores de alumínio em larga escala, estes com ou sem reforço por alma de aço. Os cabos comumente utilizados em linhas de transmissão aéreas suspensas são do tipo AAAC (Aluminium All Alloy Conductors), cabo de vários componentes condutores enrolados, todos de alumínio, e do tipo ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), cabo composto por diversos condutores de alumínio mas que também possui um condutor central (alma) de aço.



Figura 2.1 – Torres de Linhas de Transmissão - Hiroshima, Japão.
Foto: o autor - Jan/2012

As instalações de transmissão que podem percorrer grandes distâncias entre as usinas produtoras e as subestações dos centros consumidores. A etapa de transmissão dessa energia produzida até os seus pontos de consumo requer esmero cuidado e tem uma importância cada vez maior pois é um dos elos da cadeia para garantir a qualidade do fornecimento da energia através de sua disponibilidade, buscando a redução dos riscos de instabilidades e interrupções de fornecimento.

O aumento do uso de energias alternativas e renováveis tem intensificado ainda mais a demanda por linhas de transmissão ao contribuir para um maior espalhamento da produção com fontes solares, eólicas e diversas outras fontes.

2.2 Importância da Confiabilidade do Sistema Elétrico

O papel da energia elétrica tem se tornado de estratégica importância em todos os níveis de análise das famílias e empresas no mundo todo. Por eletricidade no sentido mais abrangente, compreende-se não só a cadeia de produção desde as centrais de geração elétricas, incluindo sua transmissão através das linhas, a interligação elétrica entre regiões, o controle dos fluxos de energia entre todos nós da malha, e a disponibilidade de energia no sistema como um todo.

Quanto mais o sistema possuir ramais trabalhando próximos de suas demandas máximas, menor será a capacidade de manobras alternativas dos operadores das linhas em caso de uma pane local. Sob

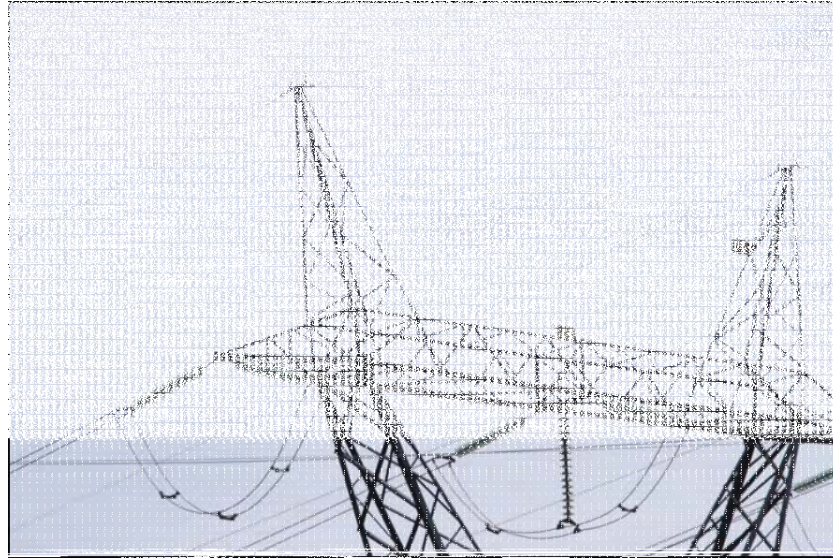


Figura 2.2 – Condutores energizados (na estrutura inferior) e cabos protetores pára-raios (nas pontas superiores) em detalhes de torre de linhas de transmissão da Eletrosul - Linha Londrina/Ivaiporã - Paraná - Brasil. Foto: o autor - Jun/2012

essas condições críticas de distribuição de carga, eventuais rompimentos de linhas em alguns pontos pode aumentar drasticamente a carga, e as perdas resistivas, em outro trecho crucial, criando o modelo de um grande resistor, enquanto eventuais desligamentos ou chaveamentos podem gerar oscilações transitórias criando modelos temporários de grandes componentes reativos, sendo que a composição disso pode resultar em circuitos equivalentes a grandes osciladores e causar instabilidades no sistema todo, ocasionar alterações transitórias em outras regiões, gerar chaveamentos instáveis dos sistemas de controle, e requerer o desligamento temporário do fornecimento de algumas regiões ou do sistema todo até a compreensão do problema e nova religação em cascata. Este é um dos hipotéticos modelos teóricos para uma interrupção de energia de grandes proporções, que denominamos de “apagão”.

A interrupção no fornecimento de energia normalmente causa impactos sociais e econômicos imediatos devido aos transtornos e dificuldades que o corte acarreta. Além da inconveniência da indisponibilidade em si, o risco de indisponibilidade eventual requer o planejamento de instalações alternativas e suprimentos adicionais de segurança em locais de demanda crítica, tudo isso gerando o efeito negativo sobre a imagem da solução de controle da infra estrutura energética da região, o que pode atrapalhar a decisão de investimentos ou a escolha do local como sede de eventos que exigem maior confiabilidade de altas demandas temporárias de energia ou de grande visibilidade e repercussão mais abrangente. Disso advém a correlação entre a capacidade de demanda energética de um sistema e a sua confiabilidade de entrega de energia.

Analisando um ponto de fixação do cabo da LINHA próximo a um grampo rígido de suporte, se nenhum outro fator ou dano pontual ocorrer, a probabilidade do rompimento do cabo nesse ponto está diretamente relacionada com o histórico da fadiga acumulada desde a sua fabricação até o momento da análise, fadiga esta ocasionada pelo impacto da contenção das vibrações eólicas por aquele grampo fixo de suspensão. O acompanhamento desse histórico de vibrações fornece condições para a estima-

tiva do risco de ruptura do cabo no ponto, permitindo prever o tempo de vida útil do mesmo (CIGRÈ, 1979), e subsidiando informações para um plano de substituição ou manutenção desses. Essa análise de vibrações, quando efetuada na etapa de refino ou do projeto em si, permite dimensionar ou otimizar os amortecedores de vibração para que se mantenha as vibrações em cada ponto abaixo dos limites máximos de segurança calculados experimentalmente (CIGRÈ, 1995).

2.3 SIN - Sistema Interligado Nacional - Brasil



Figura 2.3 – SIN - Integração das Bacias - Fonte: ONS, 2012.

No Brasil, essa malha entrelaçada que abrange quase todo o país é denominada de Sistema Interligado Nacional (SIN). “Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional em Novembro de 2012 era formado pelas empresas das regiões Sul,

Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país se encontrava fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.” (ONS, 2012). A malha do SIN permite o fluxo de energia por caminhos alternativos, o que ajuda a reduzir a instabilidade de suprimento e cobrir eventuais picos regionais. Contudo, ainda existem imperfeições no sistema de controle das demandas regionais de energia, que impactam na eficácia de gestão em caso de oscilações transitórias. Na Figura 2.3 é mostrado o esquema de interligação das bacias que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN) no ano de 2012.

2.4 Como Aparecem as Vibrações Eólicas

As Linhas de Transmissão Elétrica suspensas (aéreas) são dispostas horizontalmente (paralelas ao solo), fixas por grampos conectados a torres de sustentação, e geralmente percorrem grandes distâncias pelos mais diversos tipos de relevo e influência de ventos. Esses ventos causam vibrações que acumulam pontos de fadiga como mostrado na Figura 2.4 principalmente próximos ao engaste do cabo no suporte das torres, diretamente proporcional ao nível de vibração no ponto em que o movimento do condutor é restringido, e também diretamente relacionados com a rigidez com a qual esta restrição é feita (Hoepfner, 1994). Esses cabos sofrem vibrações primariamente causadas por oscilações induzidas pelos ventos, vistos como fluídos eólicos laminares ou turbulentos cujos vórtices se realimentam em forças verticais que geram oscilações nos cabos em frequências e amplitudes dependentes das características físicas do cabo, da tensão a que este é esticado, da montagem das torres, dos sistemas de fixação e amortecimento, da direção e energia do vento, esta última dependente da velocidade, densidade, umidade e de outros fatores do ar que o compõe.

O fenômeno da vibração eólica aplicável aos condutores elétricos foi desenvolvido classicamente em Mecânica dos Fluídos (Karman, 1912) e pode ser assim sintetizado: o escoamento constante do fluxo laminar de ar sobre o condutor cilíndrico provoca a formação e o desprendimento de uma esteira de vórtices a jusante do cabo, devido à interação do escoamento do ar com esse obstáculo. Esses vórtices se alternam periodicamente acima e abaixo do plano pelo qual flui o vento, causando uma diferença de pressões que originam forças ascendentes e descendentes, e que deslocam o cabo em movimento vertical. A diferença de velocidades entre os vórtices em formação e os em degeneração causa também uma pequena vibração torsional. Como o suporte que sustenta o cabo e restringe seu movimento tem sua principal ação de restrição na direção da força da gravidade, essa vibração no eixo vertical é de maior intensidade e normalmente é a grandeza que se monitora quando se deseja medir a vibração eólica agindo sobre os cabos de Linhas de Transmissão (Gorn, 1992).

2.5 Vibrações Galopantes não serão abordadas

Quando se refere a vibrações eólicas em todo este presente trabalho, estas estarão sempre relacionadas às vibrações causadas por esta passagem de fluxo laminar constante de ar perpendicularmente

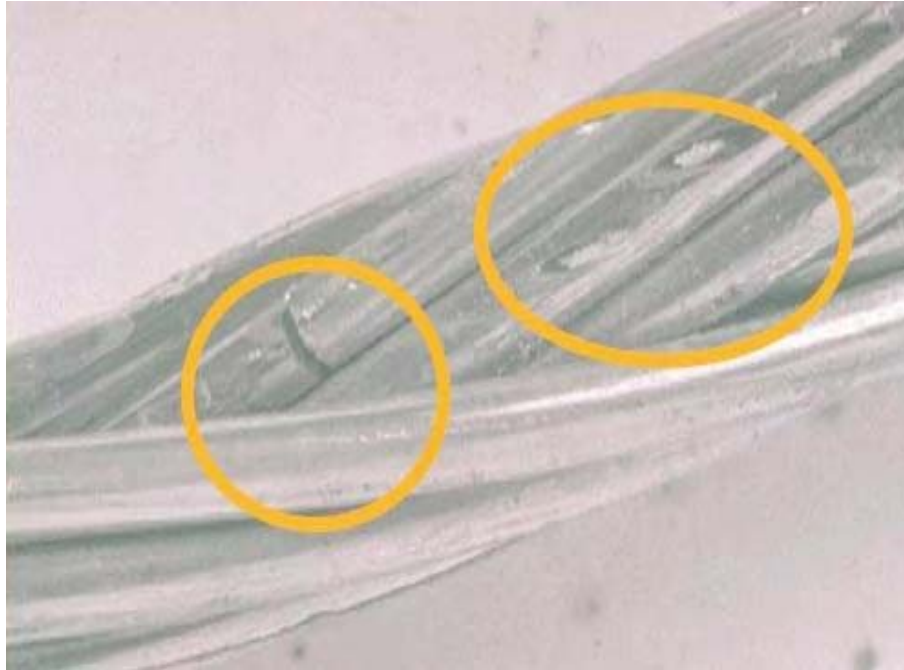


Figura 2.4 – Cabo condutor apresenta falha por fadiga - Foto: Jeff Wang - Tyco Electronics.

ao condutor, que causam fadiga e danos cumulativos, quase imperceptíveis durante a vida do condutor. Não serão abordadas as vibrações denominadas galopantes, que ocorrem normalmente durante tempestades de neve ou em situações de formação de gelo sobre os condutores (Wang, 2008). As vibrações galopantes são vibrações de amplitude bem mais alta e de frequência bem mais baixa, entre 0,2 e 0,8 Hz (Baenziger et al., 1994), normalmente causam danos extremos às estruturas e torres de suporte, mas não serão escopo deste presente trabalho por se diferenciar quanto às suas causas, frequências e consequências (danos) que causam. Quando ocorrem, estas vibrações galopantes causam danos geralmente irreparáveis aos cabos e estruturas, exigindo substituições ou reforços imediatos.

2.6 Projetos de Linha de Transmissão e Otimização de Amortecedores

As vibrações eólicas a que são submetidas os cabos das linhas reduzem o tempo de vida útil desses cabos. Uma Linha de Transmissão é construída para interligar subestações de conexões intermediárias e normalmente atravessa longas regiões, vindo a sofrer influências distintas durante o seu percurso. Os pontos que os ventos causam vibrações maiores passam a acumular fadigas também maiores, e se tornam os pontos fracos daquela linha. Essa denominação como ponto fraco implica também que o tempo de vida útil daquele trecho passa a ser menor que o restante da linha, requerendo uma atenção diferenciada. O ideal para o responsável pela operação e manutenção da linha é que todos os trechos tenham a mesma expectativa de vida útil, eliminando os gargalos ou pontos fracos susceptíveis a ruptura. Exemplo de ruptura é mostrado na Figura 2.5. Essa homogeneidade é a situação ótima do ponto de vista de custo de investimento e de manutenção. Para atingir tal objetivo, pode-se reduzir



Figura 2.5 – Ruptura de um dos fios condutores de um cabo - Foto: Sarah Chao Sun - Dulhunty Power - Australia

a vibração dos cabos nos trechos mais susceptíveis às ações dos ventos, instalando amortecedores de vibração dimensionados para aqueles trechos ou posicionando amortecedores padrão em quantidades maiores naqueles locais. Amortecedores de vibração mais comumente usados são os do tipo “stockbridge” (vide Figura 2.6) e os preformados (vide Figura 2.7). O monitoramento das vibrações eólicas dos cabos desta forma servem para medir a intensidade e frequência das vibrações, e auxiliam a otimizar o dimensionamento dos amortecedores de vibração naquele trecho de linha. Esse estudo pode ser feito nos estágios iniciais de implantação, na fase de refino de projeto, mas também pode ser requerido em casos de alterações das condições dos ventos que ocasionam as vibrações devido a alterações de topologia, vegetação ou construções na vizinhança. Podem existir casos também em que a instalação de amortecedores não seja efetuada por alguma razão e que a monitoração das vibrações seja necessária para identificar o momento mais oportuno para fazer a manutenção ou substituição desse trecho de cabo, otimizando a relação custo/benefício do trabalho.

Os pontos do cabo onde a estimativa de vida útil for menor devem receber maior atenção e planejamento imediato de ações de manutenção preventivas, instalação de amortecedores de vibração ou outros dispositivos que minimizem o acúmulo de futuros impactos e a degradação dessas regiões mais críticas do cabo. A situação ótima para o proprietário da linha é que esta tenha uma expectativa de vida uniforme e que inexistam pontos mais fracos que os demais durante sua vida útil. O importante é fortalecer somente os pontos mais fracos da linha pois estes determinam a robustez do todo. Deste modo, a monitoração das vibrações buscam localizar os pontos fracos que requeiram um reforço de atenção ou a instalação de amortecedores que reduzam as vibrações nesses pontos.

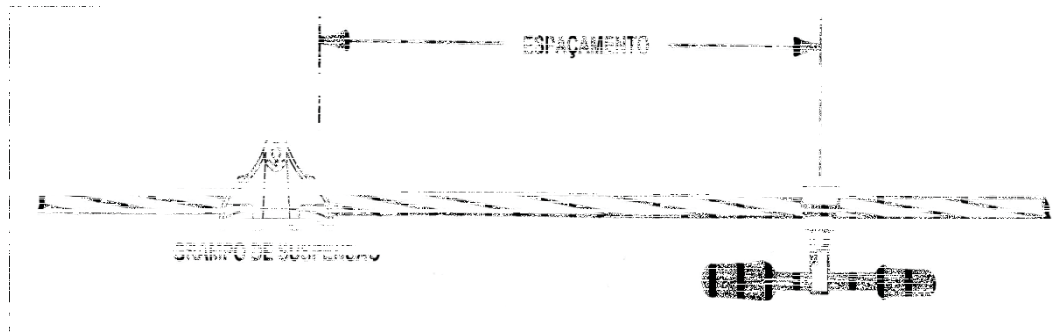


Figura 2.6 – Amortecedor de vibração do tipo Stockbridge.

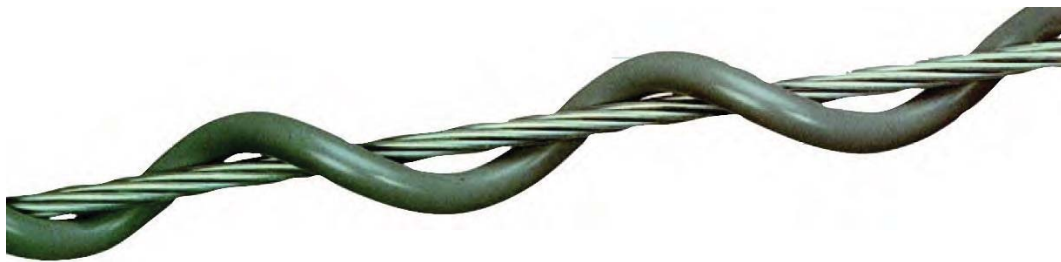


Figura 2.7 – Amortecedor do tipo preformado envolvente ao cabo -
Foto: PLP Preformados - Brasil.

A ruptura de um ou mais cabos pode desequilibrar as tensões de esticamento sobre a torre, fazendo com que esta se entorte ou mesmo seja derrubada ao solo. É mostrada ilustração de torre de transmissão caída na Figura 2.8, e também foto na Figura 2.9 de equipe efetuando instalação de reforços em torre de transmissão da linha proveniente de Itaipu após queda de uma das torres que ocasionou um apagão em 2010.

2.7 Detecções Referenciais com Extensômetros

A detecção das vibrações tem sido histórica e normalmente realizada com o uso de extensômetros, e então relacionada (Poffenberger e Swart, 1965) a amplitude de deslocamento causada pela oscilação com a tensão e fadiga no ponto de restrição do cabo.

Como padronizado pelo IEEE (1966) seguindo as descrições de Tebo (1941), monitora-se a vibração a uma distância de 89 mm (3,5 polegadas) do último ponto de contato do cabo com o grampo de suspensão do mesmo. Contudo, existem situações em que essa referência pode estar inacessível ou ser de difícil acesso devido, por exemplo, a instalações de amortecedores pré-formados em torno do grampo de suspensão. No caso de não ser possível monitorar neste ponto a 89 mm, pode-se tomar as medições a uma distância diferente e usar a distância real diretamente na equação de Poffenberger e Swart (1965), ou efetuar cálculos compensatórios para normalizar os resultados (Thomas J. Alderton, 2006): esses efeitos introduzidos pela distância do braço sensor pode ser corrigido pela normalização de todas as amplitudes obtidas multiplicando pelo fator normalizador dado por (2.1)



Figura 2.8 – Torres caídas de linhas de transmissão - Foto: Jeff Wang - Tyco Electronics.



Figura 2.9 – A estatal Furnas Centrais Elétricas anunciou em 18/08/2010 que instalou os reforços nas 70 torres de transmissão da linha de transmissão que sai da hidrelétrica de Itaipu, em Foz do Iguaçu (PR), e chega à subestação de Ivaiporã (PR), linha que ocasionou falha de energia (“apagão”). Fonte: Furnas Centrais Elétricas.

$$Normalizador = \left(\frac{89}{x_b}\right)^2 \quad (2.1)$$

O divisor x_b é a distância em milímetros entre o último ponto de contato do cabo com o grampo de suspensão medido a partir do ponto médio de fixação do sensor utilizado para monitoração.

Segundo os mesmos autores (Poffenberger e Swart, 1965), essa normalização é válida pelo menos para distâncias de até algumas vezes maior que a distância padrão de 89 mm pois considera a vibração das primeiras harmônicas da oscilação no vão entre as torres. À medida que essa monitoração se distancia do grampo de sustentação, as interferências entre as componentes harmônicas da oscilação introduzem complexidades às análises e os resultados perdem sua validade numérica.

Quando não se consegue acesso do braço sensor a um ponto de referência fixo ou onde a restrição ao movimento de oscilação do cabo ocorre, as monitorações efetuadas com equipamentos baseados em extensômetros perdem o significado, e as medidas de vibração eventualmente coletadas em um ponto qualquer do cabo em relação a outro ponto que também vibra não traz informações relevantes pois perderam a referência a um ponto de restrição, condição inicial para uso do método.

2.8 Outros Detectores de Vibração

É possível detectar as vibrações em um ponto qualquer do cabo sem a necessidade de uma referência a um ponto fixo à torre. Existem equipamentos que permitem monitorar a oscilação a partir de reconhecimento de imagens monoculares (Pan e Xiao, 2009), ou imagens binoculares (Hong-Wei e He, 2010). A primeira compara a evolução instantânea das imagens para detectar o movimento e medir sua amplitude e frequência e a segunda parte deste ponto e ainda permite a noção de profundidade do objeto.

Cita-se também o uso de acelerômetros (Guo-hua et al., 2011) ou giroscópios. Estes são chamados de detectores do tipo inercial, e referem-se às monitorações em relação à massa da Terra que, para tais efeitos, é aqui considerada a referência fixa. O uso desses detectores do tipo inercial, como já mencionado, possibilitam a monitoração sem necessidade da presença ou o acesso a um referencial fixo, muito útil no caso de, por algum motivo, os grampos de sustentação estarem em pontos inatingíveis pelo braço sensor de algum tipo de equipamento de monitoração.

O uso de detectores do tipo inercial normalmente fornece resultados de aceleração e a obtenção do deslocamento instantâneo do ponto de detecção deve ser calculada. Esta pode ser obtida através de algoritmo adaptativo que modela os componentes Fourier do sinal periódico e obtém o deslocamento por integração analítica do modelo do movimento (Tan et al., 2008), ou através de integração numérica dupla da aceleração que desconsidere eventuais deslocamentos tendenciosos (“drift”) do ponto central (médio) de vibração.

As pesquisas oriundas das análises dos dados coletados utilizando acelerômetros mostraram uma limitação do uso de acelerômetros para baixas frequências, visto que sob essas condições a aceleração

captada fica prejudicada ou mascarada pelo nível do ruído captado. Atualmente já existem acelerômetros muito sensíveis que detectam acelerações baixíssimas e que permitem a coleta desses dados no nível necessário para análise dessas vibrações.

Uma observação importante deve ser apresentada com relação a esses detectores denominados “absolutos”. Com esses, é possível detectar as vibrações em qualquer ponto do cabo, mas não é possível separar as vibrações do cabo das vibrações que porventura ocorram na própria torre ou nos acessórios de suporte desses sem a realização de uma segunda detecção, para separar a vibração deste suporte. A experiência de campo mostra que essas estruturas todas vibram em certos níveis. Vibrações da torre ou dos suportes que estejam em fase com o cabo minimizam o efeito das vibrações, ao passo que vibrações defasadas entre cabo e suporte aumentam a criticidade das mesmas. Para se compreender esse impacto com mais realismo, deve-se monitorar as vibrações separada e concomitantemente, do cabo e do suporte, de modo a analisar o efeito diferencial entre ambas.

2.9 Metodologia de Análise

Na estimação da vida útil de um condutor, o principal parâmetro associado é a “tensão dinâmica de flexão” (σ_a) cujo valor pode causar fadiga no cabo condutor junto ao grampo de suspensão. Essa tensão está relacionada à “deformação de curvatura” (ε_b) pela relação $\sigma_a = E_a \varepsilon_b$, onde E_a é o módulo de elasticidade de Young (MPa) da camada externa do cabo. Do trabalho de Poffenberger e Swart (1965), sabe-se que

$$\sigma_a = \frac{E_a p^2 d}{4(e^{-px_b} - 1 + px_b)} Y_b \quad (2.2)$$

onde d é o diâmetro do condutor [mm], x_b é a distância do ponto de medição ao ponto de contato com o grampo de sustentação [mm], Y_b é a amplitude pico-a-pico de deslocamento do condutor em relação ao grampo de sustentação [mm], e

$$p = \sqrt{\frac{T}{E_I}}$$

é a rigidez de flexão, sendo que T é a tensão de esticamento do condutor [N] e, para cabo ACSR

$$E_I = \frac{\pi}{64} (n_{al} d_{al}^4 E_{al} + n_{st} d_{st}^4 E_{st})$$

igual à rigidez nominal a flexão do condutor [N-mm²], e n_{al} é o número de fios de alumínio, d_{al} é o diâmetro dos fios de alumínio [mm], E_{al} é o módulo de elasticidade de Young do alumínio [Mpa], n_{st} é o número de fios de aço, d_{st} é o diâmetro dos fios de aço [mm], e E_{st} é o módulo de elasticidade de Young do aço [Mpa].

Atualmente são adotados dois métodos para determinação da fadiga de condutores: Limite de Resistência a Fadiga, e Método dos Danos Acumulados. Ambos estabelecem curvas limites para a tensão dinâmica de flexão.

O Método do Limite de Resistência a Fadiga assume que a manutenção dos níveis de tensão de flexão abaixo de certos limites provê vida útil infinita ao cabo, recomendando a monitoração somente dos casos em que esses limites sejam excedidos. Seguem seus pontos fundamentais (IEEE, 2006): monitorar a amplitude de vibração; obter a tensão dinâmica de flexão segundo a equação (2.2); comparar com a tensão de flexão máxima segura para o cabo obtida de dados laboratoriais (EPRI, 1979); monitorar as leituras de modo e verificar se: menos de 5% dos ciclos ultrapassa o limite de resistência a fadiga; menos de 1% dos ciclos ultrapassa 1,5 vezes esse limite; e nenhum ciclo ultrapassa duas vezes o seu valor. Esse método é bastante conservador e é considerado ultrapassado (CIGRÈ, 1995), mas ainda é muito utilizado por razões culturais, e por fornecer dados de valores de pico de vibração, necessários para dimensionamento e refino de projetos de linhas de transmissão.

O Método dos Danos Acumulados assume que cada ciclo de vibração provê uma certa quantidade de fadiga, conforme a Teoria dos Danos Cumulativos de Miner (1945). A tensão dinâmica de flexão também é obtida pela equação (2.2) mas o método, contudo, não se restringe aos ciclos acima do limite de resistência a fadiga. São feitas suposições probabilísticas sobre os ventos que induzem às vibrações e sobre a resistência a fadiga do condutor, e integrados os pequenos impactos sofridos pelo cabo durante sua vida. Esse método é recomendado pela Metodologia de CIGRÈ (1979) e também apresenta resultados conservadores para análise de fadiga, mas mais próximos aos experimentais (Braga et al., 2004). Sua validade tem sido demonstrada na teoria (Brunair et al., 1988) e também na prática, principalmente para estimativa de quantificação de danos cumulativos, o que leva à dedução da estimativa (de decaimento) da vida útil de um cabo, para a região analisada.

Neste Capítulo 2 foi apresentado um pouco da história da energia elétrica, os conceitos e necessidades de linhas de transmissão aéreas suspensa e suas torres de sustentação, noções sobre riscos e importância da confiabilidade do sistema elétrico, o Sistema Interligado Nacional (SIN - Brasil), fadigas, rupturas e problemas gerados por estas, teoria das vibrações eólicas, discorreu-se sobre amortecedores de vibração, detectores de vibração e seus tipos mais comuns, e metodologias que se pretende utilizar.

A seguir, no Capítulo 3, será apresentado o projeto e a implementação do vibrógrafo proposto. São justificadas algumas decisões de projeto e detalhados os principais componentes de hardware e fundamentos do software do equipamento e do site receptor de dados para análise.

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO VIBRÓGRAFO

3.1 Planejamento e Montagem do Protótipo

O vibrógrafo implementado conserva algumas características dos vibrógrafos comuns, e possui uma haste detectora dotada de extensômetros (“Strain Gauges”) que muda o seu valor ôhmico de resistência quando submetido a uma tração ou compressão no seu eixo sensitivo. A mudança do valor da resistência ôhmica do extensômetro é convertida através de um circuito de condicionamento em um sinal elétrico proporcional, deste modo transformando as deflexões da haste em sinais proporcionais à amplitude da deflexão. O esquema de instalação do vibrógrafo em um cabo suspenso é mostrado na Figura 3.1. Esta figura mostra o esquema da haste como implementado no primeiro protótipo (funcional) pois ilustra melhor o conceito de “último ponto de contato do cabo com o suporte”. O equipamento registra a amplitude máxima e a frequência média de oscilação em uma janela de um segundo a cada quinze minutos, conforme o padrão IEEE (Fritz et al., 1966). A amplitude (Y_b) é o parâmetro que falta para a obtenção da “tensão dinâmica de flexão” (σ_a), conforme a equação (2.2).

O Vibrógrafo é composto por um sensor que detecta as vibrações, uma etapa de condicionamento do sinal, composta pela filtragem e amplificação do sinal captado, o microcontrolador, um relógio de tempo real, uma memória adicional, e a parte dedicada à transmissão dos dados. Na Figura 3.2 é mostrado o diagrama de blocos.

O sistema é planejado para permanecer em estado de espera desde a sua inicialização até o momento em que uma aquisição de dados for necessária, a cada quinze minutos. Como as oscilações são ocasionadas pelo passagem do fluxo laminar eólico constante, essas não se alteram significativamente em curtos espaços de tempo e as amostragens a cada quinze minutos são suficientes para uma compreensão das mesmas. Essas aquisições, a cada quinze minutos, são feitas a partir de uma reanimação dos sub-sistemas, habilitação dos reguladores de tensão para energizar parte do circuito, análises e verificações de habilidades e condições, calibração dos sistemas e ajustes de parâmetros de software,

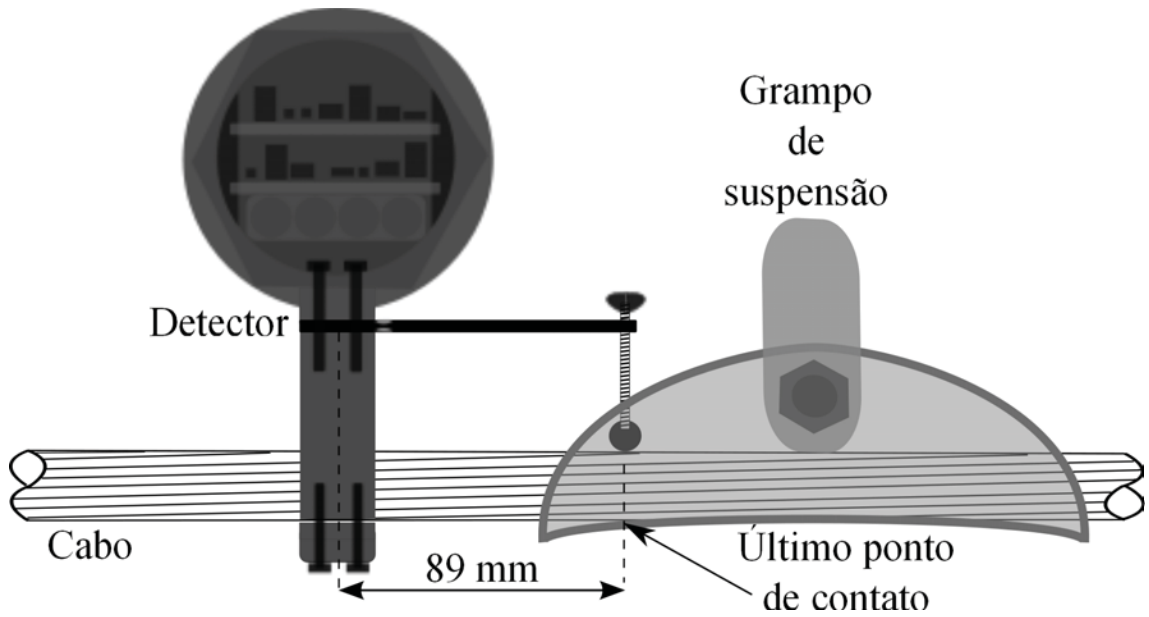


Figura 3.1 – Esquema de montagem da haste (Protótipo Funcional)

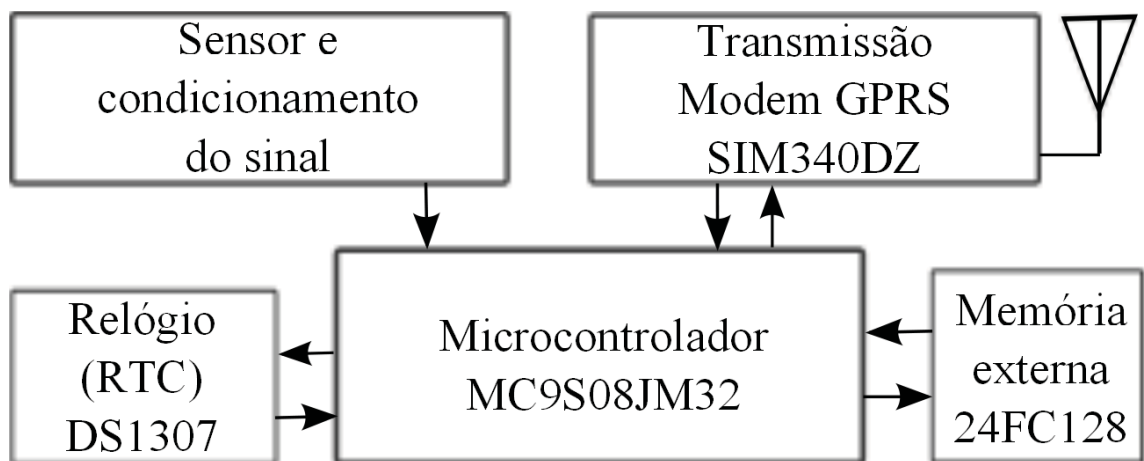


Figura 3.2 – Diagrama de blocos.

leitura do ponto médio ou de repouso, e coleta dos dados para obtenção da amplitude e frequência da oscilação.

O software de gestão processa os sinais detectados, registra as amplitudes máximas de pico a pico a cada quinze minutos, calcula a frequência de vibração, insere os dados em uma tabela e comanda uma transmissão diária através do modem.

A frequência de oscilação do sinal é obtida por software, através do método de contagens de passagens pelo ponto médio: é efetuada a aplicação de um filtro passa-baixas por software e efetuado o cômputo do período médio das oscilações. A partir daí o algoritmo obtém a frequência média do sinal oscilante.

Como descrito, o cômputo da frequência (e do impacto na fadiga) é feito somente levando em conta a componente harmônica fundamental da vibração. Os danos gerados pelos demais harmônicos são desprezados na literatura e pelos equipamentos atualmente no mercado, exceto quando estes contribuem para alterar a componente fundamental, que é monitorada. Análises aprofundadas e quantificadoras desses harmônicos de ordem superior podem ser efetuadas para conhecer esse nível de impacto, pois inclusive esta pode ser a parcela que falta para tornar os resultados do Método dos Danos Acumulados mais próximos dos valores esperados conforme as medições de laboratório, mas isto não será objeto de estudo do presente trabalho.

O sistema é alimentado por uma bateria interna que é recarregada por uma placa solar, o que dá ao equipamento uma autonomia virtualmente ilimitada, durante anos. Durante as horas de insolação diária, o painel solar fornece uma corrente de carga que carrega a bateria com energia suficiente para a noite e alguns dias de chuva ou de pouco sol. O painel testado fornece até 100 mA de corrente ao sol, mas as tecnologias em energia fotovoltaica evoluem a cada dia e, com as mesmas dimensões e para a mesma tensão, já se consegue adquirir painéis comerciais que fornecem 250 mA ou mais. Como o sistema consome abaixo de 5 mA em estado de hibernação, chega a uns 30 mA durante as calibrações e medições que duram menos de um minuto, e somente requer alguns altos picos de corrente durante a transmissão diária do modem com duração aproximada também em torno de um minuto, a energia carregada na bateria interna é suficiente para suportar diversos períodos de baixa insolação, mantendo o equipamento ligado indefinidamente.

3.1.1 Entrada do Sinal

Seguindo recomendações da norma (Fritz et al., 1966), o projeto detecta vibrações de até 150 Hz em intervalos de 2 Hz, e amplitude de até 2,0 mm em intervalos de 25 μm . A detecção do deslocamento é feita por dois extensômetros colados em lados opostos da haste sensora, causando efeito duplicado sobre uma Ponte de Wheatstone, representados por E_1 e E_2 na Figura 3.3. O circuito integrado INA125 implementa uma pré-amplificação em três mil vezes ($G=3.000$) sobre o sinal.

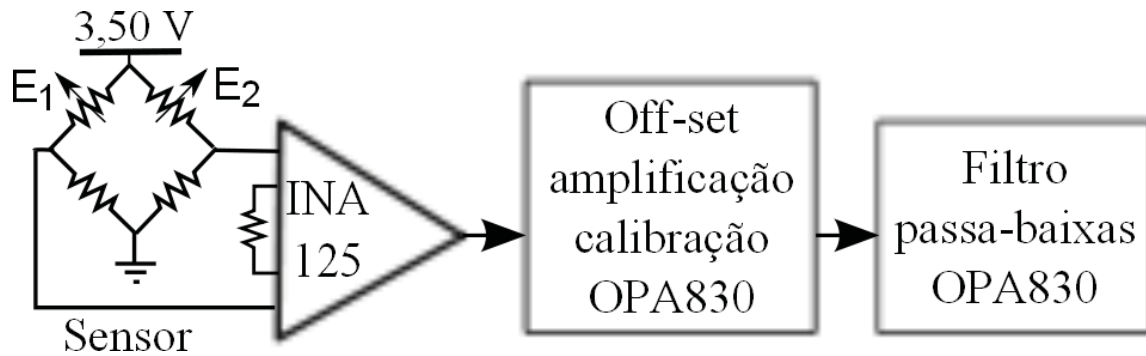


Figura 3.3 – Sensor e condicionamento do sinal.

3.1.2 Sensor Extensômetro ou “Strain Gauge”

O extensômetro tem sua resistência variável de acordo com a deformação a que é submetido. Como a haste metálica defletora é feita em aço inoxidável, utilizou-se um par de extensômetros projetados com compensação de variações térmicas apropriados para fixação em base de aço inoxidável. Isso compensa adequadamente eventuais dilatações e contrações lineares que a base de aço inoxidável venha a sofrer. A instalação do projeto propõe a montagem dupla de extensômetros, um do lado superior e outro do lado inferior da barra. A instalação em par possui dupla finalidade: compensação adicional de variações de temperatura (anulando esse fator) e inversão do sinal da deformação de um dos sensores (para amplificar sua diferença). Quando existe uma flexão para cima, o sensor superior sofre deformação no sentido de compressão enquanto o sensor inferior deforma no sentido de alongamento e vice-versa. Pelo modo como são instalados, a medição do sinal da deformação é dobrada pelo aumento da diferença de resistências entre os dois extensômetros quando um deles é instalado invertido. A compensação de temperatura é feita de modo que as resistências dos elementos variem igualmente em função da temperatura (ambos sobem ou ambos descem com a temperatura), tendendo assim a eliminar ou reduzir os efeitos dessa variação na leitura das medições efetuadas.

3.1.3 Ponte de Wheatstone

Os dois extensômetros SG1 e SG2 são instalados em lados opostos da “Ponte de Wheatstone” para que os efeitos de compensação térmica e de amplificação necessários para o sinal sejam obtidos. A “Ponte de Wheatstone” montada com os dois extensômetros fica com sensibilidade dentro dos níveis necessários para leitura das vibrações, e é ajustada para que fique em equilíbrio quando o equipamento está instalado com o sensor pré-flexionado e posicionado sobre o cabo sob monitoração. A Figura 3.4 mostra como é feita a montagem dos extensômetros (SG) e sua regulagem inicial.

Considerando o circuito da “Ponte de Wheatstone” representada, obtém-se a equação da tensão no Galvanômetro Central (sem corrente passando pelo galvanômetro, isto é, para $I_G = 0$) como:

$$V_G = \frac{V_{in}SG_1}{SG_1 + R_1} - \frac{V_{in}SG_2}{SG_2 + R_2}$$

Que pode ser também assim representada:

$$\frac{V_G}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{SG_1}} - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{SG_2}}$$

Pela equação é possível inferir duas afirmações importantes e que se tornam úteis para fins do projeto do vibrógrafo.

1. Para valores aproximadamente iguais de R1, R2, SG1 e SG2 as variações térmicas idênticas em SG1 e SG2 tendem a se anular.
2. Se uma alteração em SG1 for acompanhada por uma alteração em SG2 no sentido oposto, o efeito sobre VG fica duplicado (e vice-versa).

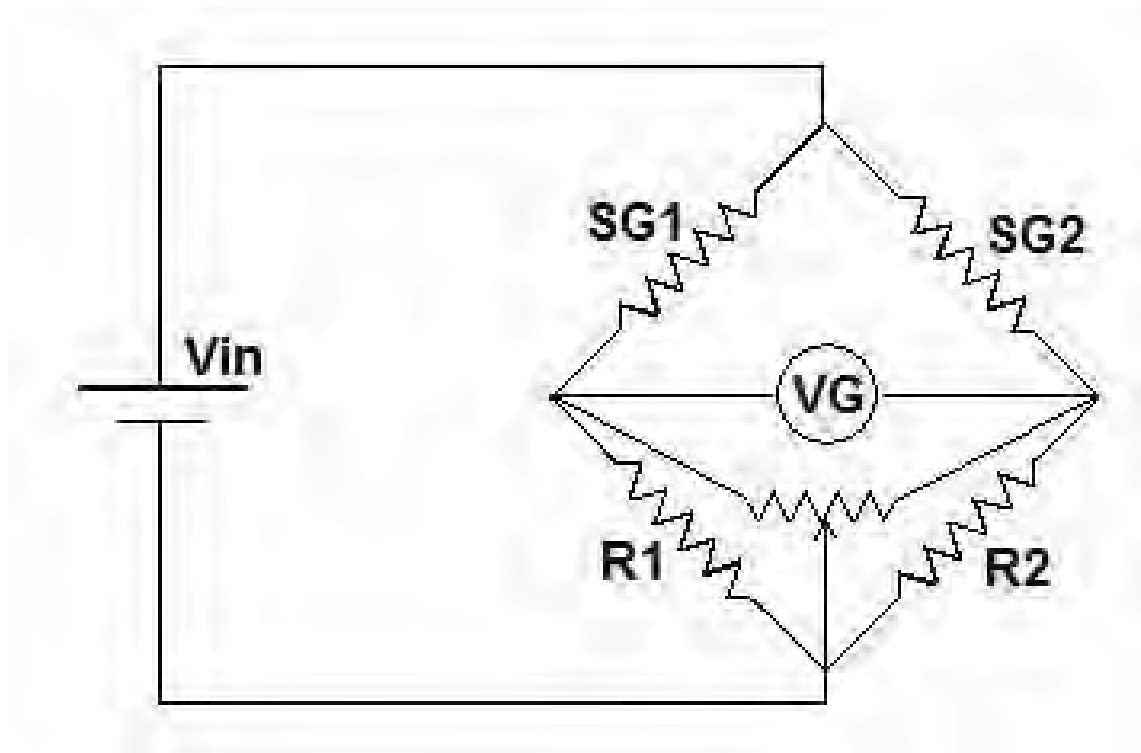


Figura 3.4 – Regulagem da Ponte de Wheatstone.

No Ponto de Repouso da haste, ajusta-se ΔR_1 para equilíbrio ($V_G=0$) e o produto cruzado das resistências volta a ser idêntico: $(SG_1 + \Delta SG) \cdot R_2 = (SG_2 - \Delta SG) \cdot (R_1 + \Delta R_1)$

$$\text{Ponte em Equilíbrio Inicial: } SG_1 R_2 = SG_2 R_1$$

$$\text{Ponte em Equilíbrio Final: } (SG_1 + \Delta SG) \cdot R_2 = (SG_2 - \Delta SG) \cdot (R_1 + \Delta R_1)$$

Sob essas condições $\Delta V_G = 0$

Esta calibração é feita somente uma vez, em laboratório, instalando-se o equipamento em um “jig” rígido, que simula a condição de repouso do cabo. Eventuais variações em campo para esse ponto de repouso são compensadas por software.

Por questões de praticidade de montagem e devido à preferência em trabalhar com resistores de precisão disponíveis no mercado, optou-se por implementar o ajuste fino do zero com um potenciômetro de alto valor em paralelo com R1 e R2 e centro ajustável conectado no terminal comum desses, que permita trazer a “Ponte de Wheatstone” ao Equilíbrio no Ponto de Repouso da haste para quaisquer configurações de variações para as mais diversas montagens de exemplares de R1 e R2 como mostrado na Figura 3.4. Esta configuração de ajuste no projeto é necessária para simplificar o processo de ajuste em uma linha de montagem sequencial do equipamento.

3.1.4 Amplificador Operacional e Filtragem

O amplificador operacional do tipo “rail-to-rail” (OPA-830) permite larga faixa de variação de amplitude para aumentar a excursão do sinal de saída. Ajusta-se o “off-set” no ponto de repouso. O ganho calibra a curva de transferência para equalização dos resultados entre diversos equipamentos. Um filtro passa-baixas ($f_c = 166Hz$) elimina os ruídos acima da frequência do sinal. Este sinal analógico calibrado é o sinal de entrada do conversor A/D do microcontrolador.

3.1.5 Ajustes Iniciais

O estágio de ajuste de “off-set” possibilita garantir que o repouso sobre esse ponto de equilíbrio mostre a amplitude no centro da faixa de detecção de movimento. O Ganho de amplificação desse sinal é ajustado para que os sinais máximos e mínimos esperados fiquem dentro da faixa de leitura do equipamento e para que a inclinação da curva de transferência se encaixe nos valores estipulados de calibração, como esperados pelo software de análise.

O ajuste do ganho poderia ser feito através do ajuste da inclinação dessa curva de transferência ou através de alterações nos parâmetros de conversão do software de tratamento do sinal. Decidiu-se por manter os parâmetros de software fixos e ajustar o ganho até que a Curva de Transferência se encaixe no perfil padrão esperado.

3.1.6 Taxa de Amostragem

Para que se visualize os casos críticos de amostragem, e sem perda de generalidade, considera-se o sinal como uma onda do tipo senoidal de 150 Hz, máxima frequência de vibração a ser detectada.

Considerando uma taxa de amostragem de 3.000 Hz, as leituras serão efetuadas pelo menos vinte vezes a cada ciclo de vibração, ou seja, a cada dezoito graus. O erro máximo de leitura de amplitude ocorrerá quando duas leituras forem efetuadas equidistantes ao ponto de máximo ou de mínimo ou, numericamente, uma a $(90-9)$ graus e outra a $(90+9)$ graus. Nesse caso, a leitura para o valor de máximo será reduzida pelo fator do seno(90 ± 9) ou 0,987. Como o erro será sempre para menor, pode-se normalizar a leitura para o centro desse intervalo, dividindo o valor por seno(94,5) ou 0,9969, corrigindo parcialmente esse erro sistêmico de amostragem. Deste modo o erro máximo será de aproximadamente 0,31%.

3.1.7 Tratamento dos Dados

O microcontrolador HC08 efetua a conversão A/D em 1.024 níveis e são amostrados 3.000 pontos por segundo. Como explicado na seção anterior, para uma onda senoidal de 150 Hz, a amostragem em 3.000 Hz gera um erro máximo aproximado de 0,31% na leitura para a amplitude de pico, o que é um valor desprezível para o erro sistêmico de amostragem. Na discretização, é utilizada uma faixa útil de 924 níveis para representar 84 intervalos de $25 \mu\text{m}$, o equivalente a 11 níveis para cada intervalo de amplitude. Assim, o erro de discretização do sinal também é 11 vezes menor que o erro introduzido pelo próprio método de separação por intervalos, e pode ser desprezado.

Foram implementados algoritmos para filtragem, cálculos de amplitude pico-a-pico, frequência média de vibração, gerenciamento da transmissão e gestão de outras funções vitais. Uma memória adicional (24FC128) é incluída no equipamento para aumento da capacidade de armazenamento dos dados. Um relógio (DS1307) com bateria própria, de duração estimada de três anos, é ajustado durante a configuração inicial na fase de calibração, e fornece a data e hora do equipamento na inicialização ou após um reset. A tabela de dados é transmitida diariamente, em torno do meio dia, por um modem GPRS (SIM340DZ) que envia os dados para um banco de dados acessível pela internet.

3.1.8 Valor Médio ou Ponto de Repouso da Haste

O ponto de repouso da oscilação é obtido partindo do pressuposto de que o sinal oscila simetricamente em torno de seu ponto médio. As vibrações típicas históricas estão em torno de quinze hertz. Assim sendo, este ponto é obtido pelo valor médio de uma amostragem de dez segundos do sinal. Inicialmente então se calcula a sua média aritmética: este será o valor do Ponto de Repouso do detector. A média aritmética dos “n” primeiros pontos $P_1, P_2, P \dots, P_n$ de uma série pode ser obtida pela fórmula:

$$M_n = \frac{P_n + (n - 1) * M_{(n-1)}}{n}$$

Utilizando a fórmula interativa acima, pode-se calcular a média indefinidamente a partir de um único (primeiro) ponto, sem a necessidade de armazenar os pontos anteriores da sequência. Isso

permite otimizar espaço de registros em memória para cálculo de média de séries longas. Deste modo, guarda-se somente os valores correntes (até “n-1”) e utiliza-os para o cálculo do próximo ponto (“n”), onde M_n = Média dos “n” pontos coletados, P_n = “n-ésimo” ponto e n = número de pontos .

3.1.9 Cálculo da Frequência a partir do Meio-Período

O meio-período médio da vibração também pode ser calculado interativamente, a partir de uma primeira passagem pelo ponto de repouso: a cada passagem pelo ponto de repouso, conta-se a ocorrência. Ao final da amostragem espera-se certo tempo até a ocorrência da próxima passagem (ou interrompe-se o processo no caso de “time-out”) e obtém-se a média dividindo o(s) meio-período(s) pelo número de ocorrências e daí se obtém a frequência.

$$MP_{Medio} = \frac{Tempo}{m}$$

$$F_{vibr} = \frac{1}{2 * MP_{Medio}}$$

onde: MP_{Medio} é o meio-período médio e m = número de passagens pelo ponto médio

3.1.10 Amplitude do Sinal

- Um registrador interno armazena o valor máximo do sinal digitalizado entre as amostras do período (VMAX)
- Outro registrador armazena o valor mínimo do sinal (VMIN)
- A diferença entre eles é a Amplitude pico-a-pico do sinal ($A=VMAX-VMIN$)

3.1.11 Reset do Sistema

Caso ocorra de a bateria se descarregar completamente, ou ocorra um erro que requeira reset do sistema, este se inicializa automaticamente quando a carga retornar a um nível mínimo, analisa algumas funções básicas do equipamento, atualiza data e hora a partir do relógio de tempo real (RTC) interno, e por fim reativa suas funções plenas.

3.2 Detalhes e Aperfeiçoamentos do Protótipo Final

A partir das descobertas e aperfeiçoamentos do primeiro protótipo, foi montado um sistema final aperfeiçoado, com grandes alterações no formato e aparência externa, integração e unificação de

placas de circuito impresso em uma placa única que engloba reguladores, microcontrolador e seus auxiliares, conectores, modem e demais circuitos. Foram alteradas baterias internas, módulos carregadores, feita a incorporação de diversas melhorias de software, alteração na haste de detecção para uma haste conjugada mais prática e funcional, alterações no modo de fixação do equipamento à linha que se deseja monitorar de modo a tornar o equipamento mais prático para ser instalado nas torres, por um operador pendurado etc. Este reprojeto foi denominado Protótipo Final.

A seguir são apresentados os resultados da montagem do sistema completo. Algumas características serão a seguir mais detalhadas, ou explicadas em pontos onde foram introduzidas alterações e melhoramentos incorporados ao Protótipo Final.

3.2.1 Sistema de Redes de Vibrógrafos

A Figura 3.5 apresenta o esboço do sistema proposto. Basicamente, em pontos estratégicos do sistema de transmissão de energia elétrica, vibrógrafos são instalados em um dos condutores de uma torre de transmissão. Além de dados referentes as vibrações, cada vibrógrafo registra também a temperatura. Em cada instrumento desenvolvido, todos os sensores estão conectados a um registrador de dados, chamado “módulo de aquisição”, composto basicamente por um microcontrolador (responsável por toda a temporização, digitalização das grandezas, gerenciamento das atividades, etc.), memória flash para armazenamento dos dados e um circuito de transmissão de dados sem fio baseado no protocolo GPRS (Ibrahim e Ibrahim, 2010). Diariamente, cada módulo de aquisição envia os dados coletados a um servidor na internet, onde os mesmos ficam disponíveis para análise através de um servidor web.

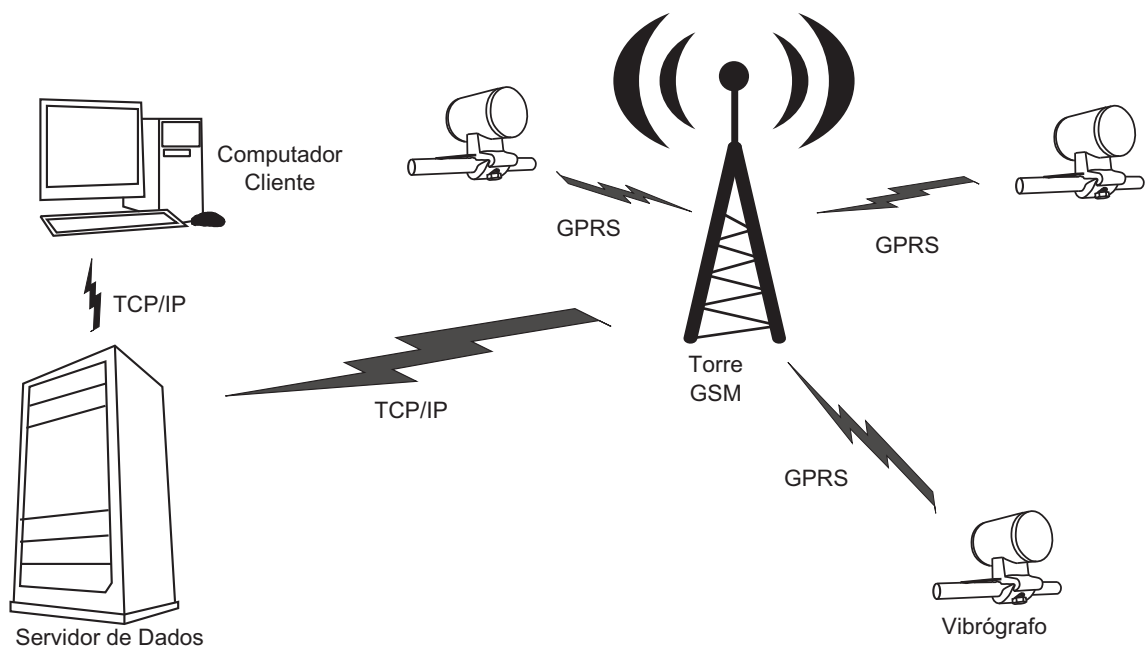


Figura 3.5 – Esboço do sistema de aquisição de dados distribuído desenvolvido.

Os diversos componentes do sistema são descritos nas próximas subseções.

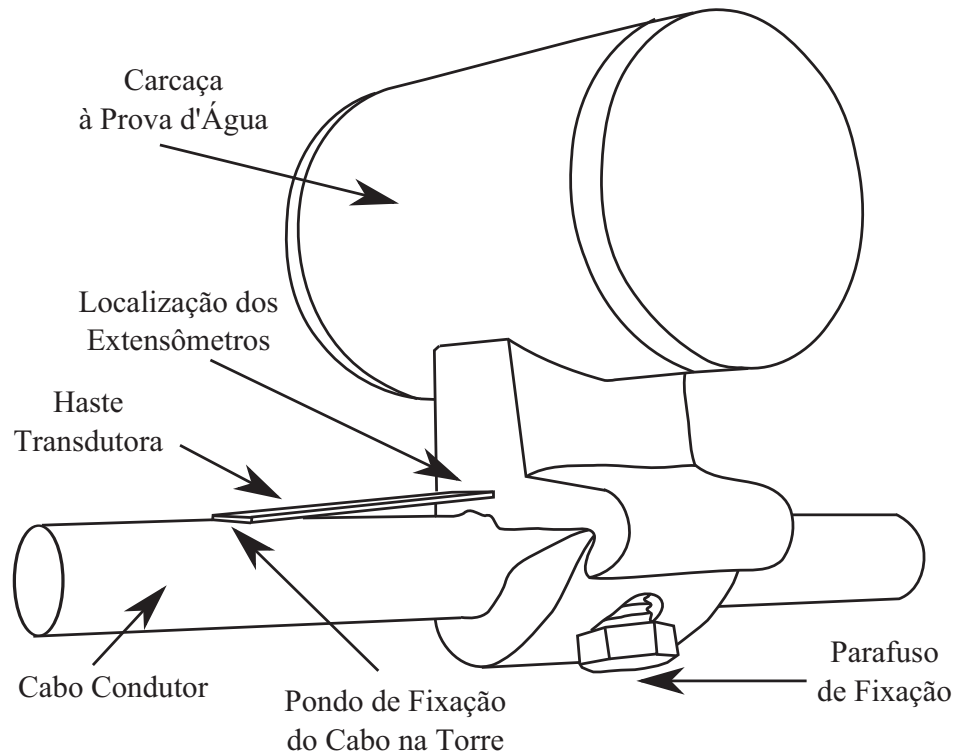


Figura 3.6 – Esboço do vibrógrafo desenvolvido. A ponta da haste transdutora toca o cabo a 89 mm do ponto médio do suporte, pois a vibração deve ser medida a esta distância do ponto de fixação do cabo na torre.

3.2.2 Medição da Vibração

A Figura 3.6 apresenta o esboço do vibrógrafo desenvolvido. Basicamente, ele é composto por uma carcaça protetora, à prova d'água e feita de policloreto de polivinila (PVC). Tal carcaça é fixada ao cabo condutor através de uma base constituída por um grampo ajustável ao diâmetro do cabo. Por sua vez, esta base possui uma haste feita de mola (SAE1070) que, quando instalada em contato com o cabo, fica tensionada sobre a superfície deste e o toca a uma distância de 89 mm do ponto médio do suporte da base. Próximo à fixação desta haste, são colados extensômetros que sentem as deformações impostas pelo maior ou menor tensionamento ocasionado à mola pelo deslocamento do cabo (Figura 3.6). No caso particular do projeto, a deformação da mola está diretamente relacionada ao deslocamento vertical do cabo ocasionado pela vibração eólica. Assim, a vibração é medida indiretamente, através da medição da deformação na haste. Tal deformação é inferida utilizando dois extensômetros de 360Ω (considerados idênticos) fixados na mola transdutora e que possuem uma característica de transferência linear dentro da faixa de uso (Figura 4.2). Por sua vez, os extensômetros (referenciados por SG_n) estão conectados a uma estrutura em ponte, como ilustrado na Figura 3.4. Além disto, cada extensômetro está fixado em um lado diferente da haste transdutora, de modo que quando um dos extensômetros sofre um aumento na sua resistência (devido a deformação), o outro sofre uma redução. Isto aumenta a sensibilidade da ponte de Wheatstone e reduz a influência da variação da resistência de SG_n com a temperatura conforme já discutido anteriormente.

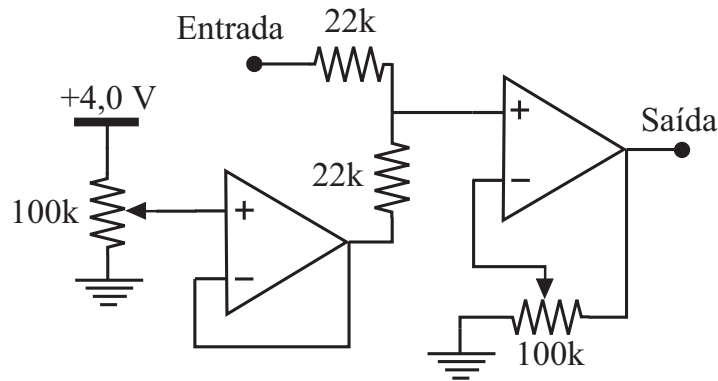


Figura 3.7 – Circuito de condicionamento que adequa o sinal de tensão do transdutor ao conversor A/D utilizado para digitalização. Todos os amplificadores operacionais são OPA4830.

No circuito da Figura 3.4, o potenciômetro deve ser ajustado para garantir que a estrutura em ponte terá uma saída nula em repouso (quando não há vibração). O sinal da ponte (proporcional à vibração no cabo condutor) é então amplificado pelo circuito integrado INA125, da Texas Instruments. Este foi escolhido porque reduz a quantidade de elementos discretos necessários, pois ele já possui internamente uma tensão estável de 2,5V ($\pm 0,5\%$ e ± 35 ppm/ $^{\circ}$ C) para excitar a ponte (Figura 3.4) e um amplificador de instrumentação para amplificar o sinal diferencial da ponte. O ganho deste amplificador é dado por um único resistor (R_g) e foi feito igual a $G = 1822,18$. Infelizmente, o INA125 não é *rail-to-rail*. Por isto, quando alimentado por uma fonte única de +4,0 V (como na presente aplicação), produz um sinal entre +0,3 e +2,8 V em sua saída. Assim, é necessário ainda um segundo estágio de amplificação para condicionar esta saída para a faixa dinâmica do conversor A/D que digitalizará o sinal, ou seja, 0 e +3,3 V.

Como está normatizado que a vibração do cabo medida deve ser classificada em uma dentre 32 faixas possíveis, a exatidão exigida para a aplicação é de $\pm 1,56\%$, o equivalente a 5 bits. Por isto, para condicionar o sinal de saída do INA125, um amplificador operacional de propósito geral pode ser utilizado. No presente trabalho, o OPA4830 (da Texas Instruments) foi o escolhido. Os principais motivos foram: o fato dele ser *rail-to-rail* (queda total de apenas 220 mV em seus transistores internos de saída) e funcionar com fonte única de +4 V. O circuito de condicionamento utilizado é o apresentado na Figura 3.7. Este, de acordo com o ajuste de dois potenciômetros (Figura 3.7), além de amplificá-lo, possibilita que uma tensão de desvio positiva seja somada ao sinal de saída do INA125. Desta forma, é possível ajustar o circuito para que sua saída seja 1,65 V quando não houver deslocamento, 110 mV quando o deslocamento for de -1 mm (em relação ao repouso) e 3,19 V quando o deslocamento for de 1 mm. Isto faz com que, quando o cabo condutor estiver vibrando com o deslocamento máximo esperado (2 mm de pico a pico), o sinal de tensão correspondente excursionará por quase toda a faixa dinâmica do conversor A/D que digitalizará o sinal.

O sinal na saída do circuito de condicionamento da Figura 3.7 é aplicado a um filtro passa-baixa de segunda ordem. Este é do tipo Chebyshev, com frequência de corte de 166 Hz, *ripple* de apenas 0,1 dB e, além de eliminar sinais de alta frequência, tem a função de evitar o fenômeno de *aliasing*.

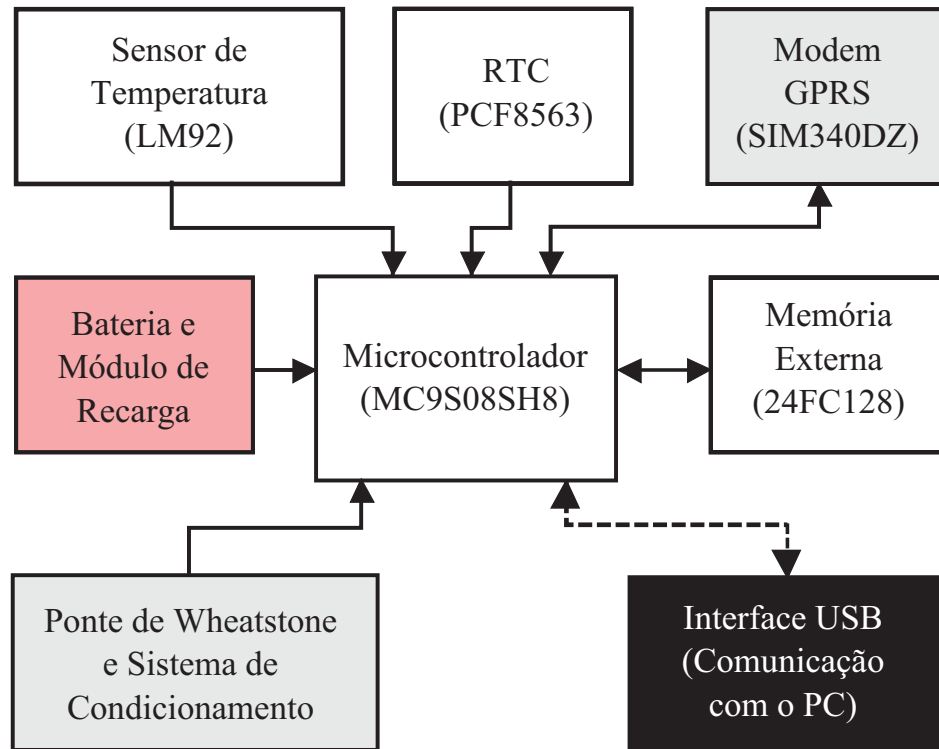


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do módulo de aquisição desenvolvido. A interface USB é utilizada apenas para depuração.

3.2.3 Módulo de Aquisição

O diagrama de blocos do módulo de aquisição implementado está esboçado na Figura 3.8. O “coração” do sistema é o microcontrolador MC9S08SH8, da *Freescall*. Tal microcontrolador foi escolhido principalmente pelos baixos custo e consumo (máximo de 1,5 mA @ 4 MHz e 5 V), que possibilita uma maior autonomia ao sistema.

Além do registro dos dados de vibração, a cada 15 minutos o módulo de aquisição armazena também a tensão do banco de baterias que o alimenta (Seção 3.2.6) e a temperatura, através de um sensor LM92, da Texas Instruments, que tem precisão de 0,33°C. Todos os dados adquiridos são armazenados em uma memória *flash* de 8 kbyte (*chip* 24FC128 da Microchip).

A seguir, os principais aspectos do módulo de aquisição são discutidos.

3.2.4 Transmissão dos Dados

Os dados adquiridos devem ser transmitidos a um computador para armazenamento definitivo. Por isso, o vibrógrafo depende de um método eficiente de transmissão de dados. Isto é necessário também para, no caso de muitos pontos de monitoramento, que os dados fiquem centralizados em um único local e estejam disponíveis rapidamente para análise. A transmissão de dados é feita através de um circuito integrado (CI) SIM340DZ, fabricado pela *Simcom Wireless Solutions*. Esse permite o en-

vio de dados através do protocolo GPRS, opera com baixo consumo (modo conectado com consumo de 400 mA, e; 8 mA em modo de espera).

O termo GRPS (General Packet Radio Services), ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio, significa uma tecnologia introduzida com o objetivo de aumentar as taxas de transferência de dados entre celulares, facilitando a comunicação e o acesso a redes. Também permite que vários usuários compartilhem os mesmos recursos, o que possibilita aumentar a capacidade da rede.

A comunicação entre o SIM340DZ e o MC9S08SH8 é realizada através da comunicação RS-232. Para reduzir o consumo, o SIM340DZ permanece quase todo tempo em modo de espera. Então, uma vez ao dia, em horário pré-configurado, o microcontrolador ativa o SIM340DZ para transmissão de informações (identificação do vibrógrafo, horário do início da aquisição dos dados, taxa de amostragem, além das leituras das grandezas monitoradas de temperatura, amplitude e frequência das vibrações). O início da transmissão dos dados é sincronizada por um RTC (*Real Time Clock*) externo do microcontrolador. Além disso, para checar a integridade dos dados, utilizou-se simplesmente um byte de *checksum*, ou seja, caso a soma de todos bytes recebidos (descartando todos os *overflows*) seja diferente do *checksum* enviado pelo vibrógrafo, o servidor central envia um comando para que todos os dados sejam enviados novamente.

3.2.5 Sincronização de Tempo

A sincronização de tempo é um requisito comum em sistemas de aquisição de dados. O caso desse vibrógrafo implementado não é um exemplo de aplicação de tempo-real com restrições de tempo muito rigorosas. Por isso, as medições ocorrem em intervalos da ordem de minutos e, em geral, uma precisão típica aceita para essa taxa é um minuto (dos Santos, 2008). Por conta disto, na presente pesquisa, inicialmente, tentou-se usar uma base de tempo baseada no RTC interno ao próprio microcontrolador MC9S08SH8. Para isto, como este RTC não é indicado para registro de data e hora, o sistema estava fazendo tal registro através do SIM340DZ, usando informações da própria rede GSM. Contudo, durante a instalação do vibrógrafo, quando o modem não conseguia conectar-se a rede GSM por algum motivo, o sistema ficava sem uma base de tempo válida. Para evitar isto, foi inserido no sistema o circuito integrado PCF8563, da NXP Semiconductors. Este tem interface I2C, modo de baixo consumo (1 nA @ 3V) e permite ao vibrógrafo registrar facilmente desde os segundos até a contagem dos anos. Esta solução mostrou-se mais adequada. Agora, no caso da instalação de diversos vibrógrafos ao mesmo tempo, no momento da configuração, basta o usuário atualizar o relógio de cada um para que todos estejam sincronizados com a precisão requerida pela aplicação.

3.2.6 Características de Consumo

O módulo de aquisição é alimentado por um banco de quatro de baterias recarregáveis de NiCd e 1,25V, totalizando 5,0 V e 10,6 Ah. Contudo, diferentes partes do sistema são alimentados por tensões diferentes. Na Figura 3.8, a parte responsável pela interface USB é alimentada com 5 V,

mas apenas quando está conectada a um computador. Dessa forma, quando não é utilizada, ela não consome corrente do banco de baterias. Por outro lado, os blocos apresentados na cor branca (Figura 3.8) são alimentados com +3,3 V, através de um regulador LP2981, da National Semiconductor. Este componente fornece corrente máxima de 100 mA e foi escolhido principalmente porque precisa de uma tensão de entrada de apenas +3,5 V para funcionar. Por fim, os blocos apresentados na cor preta (Figura 3.8) são alimentados com +4,0 V, fornecido por um regulador ADP3334, da Analog Devices. Este fornece corrente máxima de 0,5 A e precisa de uma tensão de entrada de apenas +4,4 V para operar corretamente. Além disto, o ADP3334 possui um pino especial para ser colocado em modo de hibernação, de baixo consumo, consumindo apenas 10 nA nessas condições. Dessa forma, para aumentar a autonomia do sistema, na maior parte do tempo, o microcontrolador desliga o sistema de transmissão e de transdução. É importante observar também que, durante a transmissão dos dados, o modem GPRS utilizado no projeto demanda picos de corrente de 2,0 A e 577 μ s de duração a cada 4 segundos. Estes picos são fornecidos por um capacitor de 100 μ F, paralelo ao ADP3334. Nos testes realizados, este capacitor sempre conseguiu fornecer a corrente extra exigida pelo modem. Na figura 3.9 é mostrada uma vista superior com visão do painel solar e da antena montados no equipamento Protótipo Final.



Figura 3.9 – Visão superior mostrando painel solar e antena - Protótipo Final.

3.2.7 Interface com o Computador

O módulo de aquisição pode se comunicar com um computador via interface USB, através do CI FT232B fabricado pela FTDI. A comunicação entre o FT232B e o MC9S08SH8 se dá através de

comunicação RS-232 (assim como o modem GPRS). Por isto, antes do início da operação normal do instrumento, o operador deve optar (manualmente) entre a comunicação USB e a transmissão de dados sem fio. Apesar disto, a comunicação com o computador é muito útil para depuração de erros, quando o *software* que controla o módulo de aquisição está sendo atualizado.

3.2.8 *Software* de Gerenciamento

A Figura 3.10 apresenta um esboço da máquina de estados do *software* feito para gerenciar o módulo de aquisição. Por sua vez, a descrição de cada estado desta figura é descrito na Tabela 3.1. De uma forma geral, o funcionamento de tal *software* pode ser descrito como segue.

Logo após o módulo de aquisição ser energizado, o sistema entra em fase de configuração (estado S0.0, na Figura 3.10), quando todos os seus componentes são inicializados. Em seguida, o regulador ADP3334 é ativado (estado S1.0), deixando em modo de espera, ambos: o subsistema de transmissão de dados e o de medição da vibração. Nesta fase, isto é feito para que o modem GPRS possa ser acordado (estado S2.1), o sistema seja conectado à internet (S2.2) e a identificação do vibrógrafo (S2.3), em conjunto com uma mensagem de “inicialização bem sucedida” (S2.4), sejam enviadas ao servidor central. Depois, o modem é posto em modo de espera (S2.5), pouco antes dos subsistemas serem desenergizados (S3.0) e todo o módulo de aquisição permanecer em modo de hibernação (estado S4.0), com consumo mínimo de energia. Após 15 minutos, o sistema sai da hibernação e os subsistema são energizados (S1.0) novamente para que possam ser medidos dados relacionados a vibração (estados de S5.1 a S5.2), a temperatura (S5.3) e a tensão da bateria (S5.4), para depois, os subsistemas serem desenergizados (S3.0) e todo o sistema entrar em hibernação (S4.0) ou (apenas uma vez a cada 24h) conectar-se à internet novamente (S2.1 a S2.5), desta vez, para envio de todos os dados adquiridos (S2.4). Durante a transmissão dos dados, se algo der errado em um dos estados de S2.2 a S2.4, é feita uma nova tentativa, voltando ao estado S2.2. Após três tentativas sem sucesso, o modem é posto em hibernação (S2.5) e mais três tentativas serão feitas logo após o fim (S5.4) da próxima aquisição de dados.

3.2.9 Servidor de Dados

O aplicativo que recebe os dados do vibrógrafo roda em ambiente GNU/Linux, foi desenvolvido em linguagem C, mas também utiliza módulos em linguagem *Python* e lista de comandos *bash* (Newham e Rosenblatt, 2005). Seu funcionamento é simples. Basicamente, o aplicativo procura por conexões TCP em uma porta específica. Então, ao perceber uma tentativa de conexão, este certifica-se que seja um vibrógrafo que está tentando conectar-se. Se a identificação for positiva, os dados são recebidos e armazenados temporariamente em um arquivo texto. Ao final, os dados são processados, disponibilizados em um servidor WWW e enviados por *e-mail* para os usuários do sistema.

A seguir, os principais aspectos do servidor de dados são discutidos.

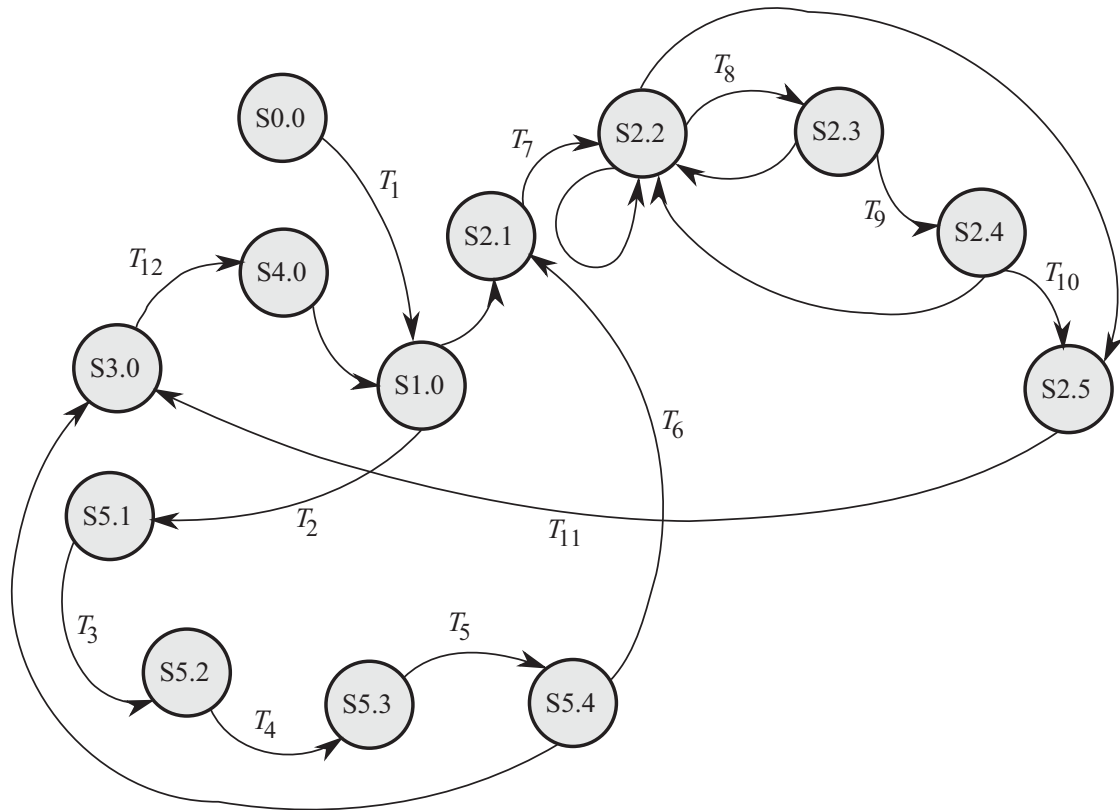


Figura 3.10 – Máquina de estados do módulo de aquisição.

3.2.10 Recepção dos Dados

Como já discutido, quando executado, o servidor de dados desenvolvido procura por conexões TCP em uma porta específica. Normalmente, qualquer servidor TCP recebe pedidos de conexão de vários clientes espúrios. Provavelmente, na maior parte das vezes, esses clientes espúrios são “robôs”, por exemplo, de serviços de buscas. Por isso, logo após estabelecer uma conexão TCP com um cliente, o servidor aguarda o envio de uma senha. Caso a senha não seja reconhecida, a conexão é encerrada imediatamente. Caso contrário, após o reconhecimento da senha, os dados são armazenados em um arquivo texto, exatamente como recebidos. Depois disso, a conexão é encerrada pelo próprio cliente (no caso, um vibrógrafo). Em seguida, os dados são analisados automaticamente à procura da identificação do cliente no cabeçalho do arquivo salvo. Após a identificação, o nome do arquivo de dados é definido de acordo com o formato “ID.ANO.MES.DIA_HH.MM.SS.txt”, onde ID, ANO, MES, DIA, HH, MM e SS referem-se, respectivamente, a identificação do vibrógrafo, o ano, mês, dia, hora, minutos e segundos da data de recebimento dos dados. Depois disso, os dados recebidos são processados automaticamente como descritos na seção seguinte.

Apesar do canal de comunicação ser compartilhado, o sistema aceita que, em um mesmo instante, mais de um vibrógrafo envie as informações ao servidor de dados. Além disso, caso um vibrógrafo não consiga conectar-se ao servidor, após três tentativas consecutivas sem sucesso, o módulo volta a fazer aquisição normalmente. Em seguida, logo após a terceira aquisição de dados, ele retorna a tentar conexão. Isto não traz muitas consequências, pois há mais memória de armazenamento que a

Tabela 3.1 – Descrição dos estados do módulo de aquisição.

| Estado | Descrição |
|--------|---|
| S0.0 | Configuração de todo o sistema |
| S1.0 | Energização dos subsistemas |
| S2.1 | Ativação do modem GPRS |
| S2.2 | Conexão do modem à Internet |
| S2.3 | Envio do cabeçalho |
| S2.4 | Envio dos dados |
| S2.5 | Modem em hibernação |
| S3.0 | Desenergização dos subsistemas |
| S4.0 | Hibernação do microcontrolador |
| S5.1 | Medição do valor médio da vibração |
| S5.2 | Medição da amplitude e da freq. de vibração |
| S5.3 | Medição da temperatura |
| S5.4 | Medição da tensão da bateria |

requerida. Assim, se necessário, estes podem permanecer até pouco mais de 2,5 dias sem transferir os dados para o servidor. Além disso, sua capacidade de armazenamento pode ser facilmente expandida bastando, simplesmente, substituir o 24FC128 por um chip com maior capacidade. Isto porque a comunicação entre a memória e o microcontrolador ocorre através do barramento I2C.

3.2.11 Processamento dos Dados

O servidor de dados foi projetado para receber dados de diversas aplicações. De fato, atualmente, este mesmo aplicativo está sendo utilizado para receber dados de diferentes projetos, nas mais distintas áreas. Assim, para atender as necessidades de projetos distintos, após a recepção dos dados, uma vez que o dispositivo que os enviou tenha sido identificado, o aplicativo procura por uma lista de comandos *bash*. Dessa forma, dependendo das características da aplicação, pode-se realizar um processamento específico nos dados recebidos. Além disso, esse processamento pode ser modificado facilmente, sem alterações no código do servidor de dados e sem nem mesmo ser necessário a sua reinicialização, bastando apenas alterar a lista de comandos que corresponde às miniestações.

A listas de comandos que corresponde ao vibrógrafo, de acordo com as informações recebidas, realiza as seguintes tarefas: a) identifica a data e o horário do registro de cada uma das grandezas monitoradas; b) armazena os dados em um arquivo do tipo CSV Shafranovich (2005), onde os dois primeiros campos dos registros deste arquivo contêm informações de data e horário da aquisição, enquanto que os demais campos subsequentes possuem os valores das grandezas monitoradas (umidade, temperatura, molhamento foliar e índice pluviométrico), e; c) compacta o arquivo CSV em um arquivo no formato zip (Deutsch, 1996). Após isto, os arquivos do tipo CSV podem ser facilmente importados em planilhas eletrônicas como o *Microsoft Excel*[©], facilitando a análise posterior dos dados.

Após o processamento, o arquivo compactado contendo a planilha com os dados é transferido (via protocolo ftp) para um computador na internet, tornando-o disponível em um servidor WWW. Além

disto, o mesmo arquivo também é enviado por *e-mail* para os responsáveis pela análise dos dados, facilitando o processo.

3.2.12 Registro de Eventos

O aplicativo desenvolvido é executado em um servidor GNU/Linux de forma independente, como um processo em segundo plano, ao invés de ser controlado diretamente por um usuário. Optou-se por isso para que ele pudesse ser instalado em um servidor remoto. De fato, nos testes realizados, o aplicativo foi instalado em um dos servidores da Assessoria de Tecnologia de Informação da Universidade Estadual de Londrina, em uma máquina virtual com o sistema operacional Ubuntu 10.10, sem ambiente gráfico. Por isso, os eventos (mensagens de avisos, erros, etc) são gravados em um “arquivo de registro” do sistema operacional. Também, para facilitar o acesso a tais mensagens, o aplicativo atualiza automaticamente uma conta na rede social Twitter[©] (conta @la2iserver). Isso porque disponibilizar as informações no Twitter[©] garante o acesso rápido às mesmas e é útil tanto para os desenvolvedores, pois facilita a descoberta da origem de eventuais problemas, quanto para os usuários, que podem saber facilmente o estado do servidor de dados. As mensagens são enviadas para o Twitter[©] através de um módulo do aplicativo escrito em linguagem *Python* e que usa a biblioteca *Tweepy* (Roesslein, 2011).

O Diagrama Esquemático completo do circuito eletrônico é mostrado na Figura 3.11. O termo PCB ou PCI é normalmente usado para referenciar uma placa, significando Printed Circuit Board (em inglês) ou Placa de Circuito Impresso (em português). Como os componentes ficam muito pequenos e compactos na representação do diagrama completo, serão

As partes são mostradas separadamente para melhor visualização. Na Figura 3.12 são mostrados os conectores provenientes da bateria e do painel solar (fonte). Após ligada pela chave geral J1, a tensão é denominada de VB.

O circuito da Figura 3.13 mostra o regulador de potência LP2981 cuja entrada não regulada VB é a tensão da bateria e a saída VA = 3,30 Volts.

O circuito da Figura 3.14 mostra o regulador de potência ADP3334 cuja entrada não regulada VB é a tensão da bateria e a saída VA = 4,20 Volts.

O circuito da Figura 3.15 mostra o Microprocessador HC08, circuito de reset, cristal oscilador, relógio de tempo real, memória, saída para USB e demais conexões do sinal (OUT) e com o MODEM (RX, TX, RTS, CTS).

O circuito da Figura 3.16 mostra o sinal dos extensômetros (CON7) conectados na Ponte de Wheatstone e entrando no INA125 para amplificação prévia, e depois passando pela etapa de condicionamento do sinal (Offset, ganho e filtro) para ajuste e calibração da curva de transferência do sinal.

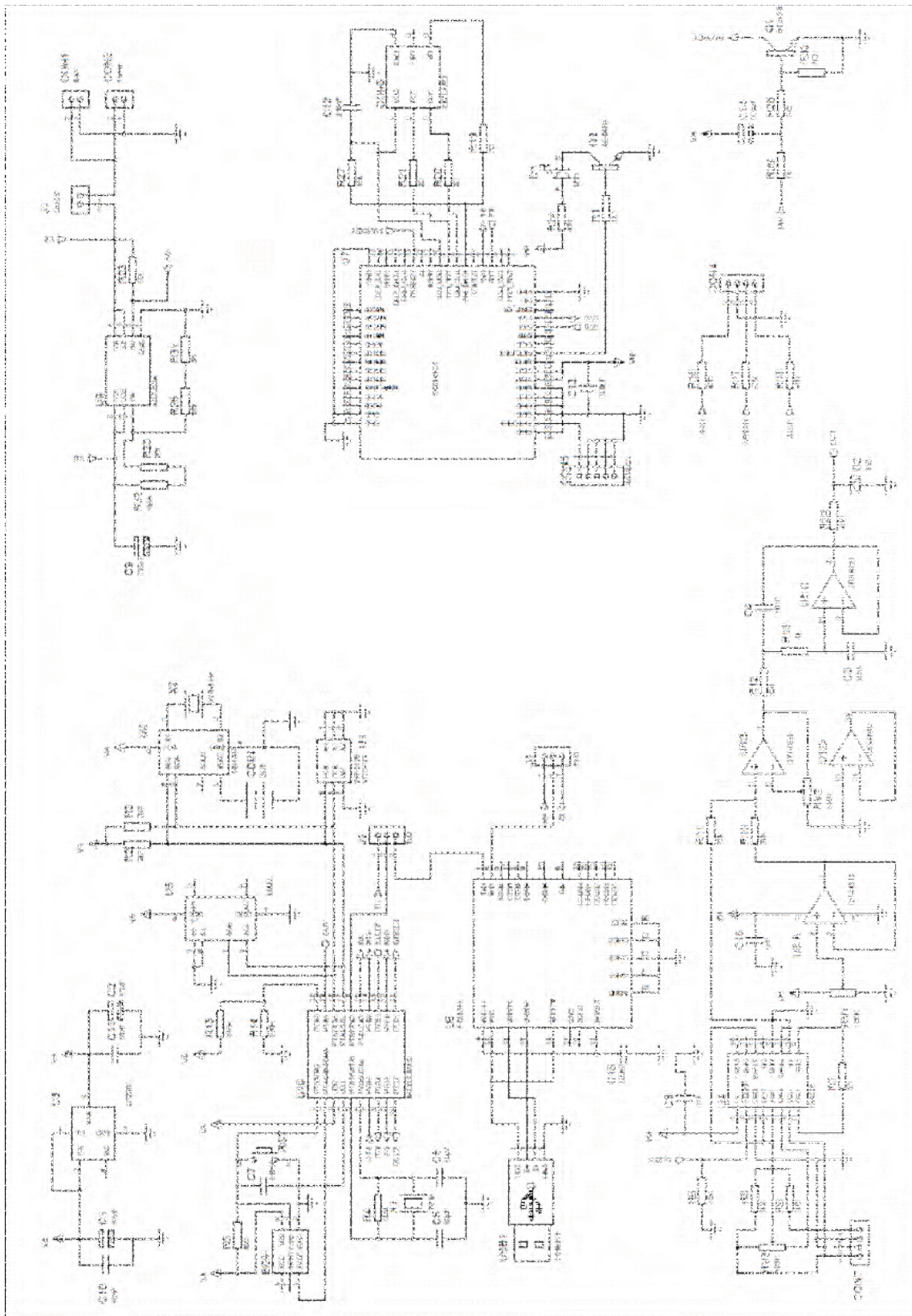


Figura 3.11 – Diagrama Esquemático do vibrógrafo - Protótipo Final.

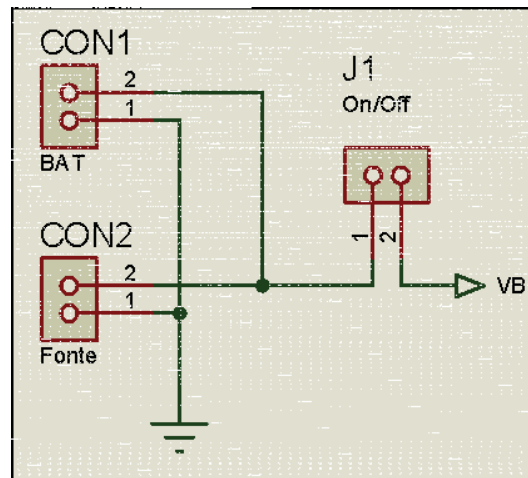


Figura 3.12 – Conectores de Energia, Tensão de Entrada VB.



Figura 3.13 – Regulador LP2981 - Tensão de 3,30 Volts para Microcontrolador.

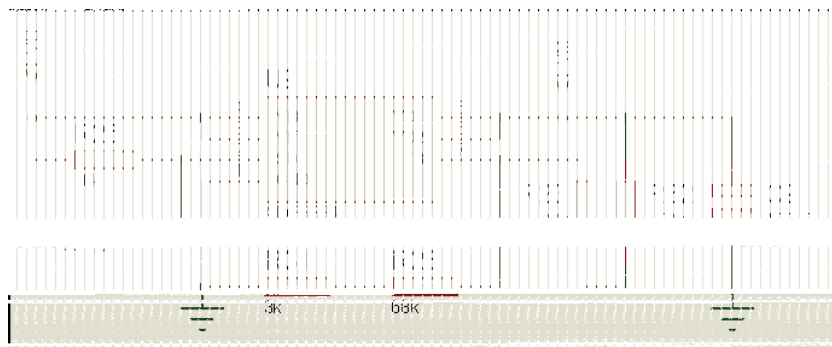


Figura 3.14 – Regulador ADP3334 - Tensão de 4,20 Volts para MO-DEM.

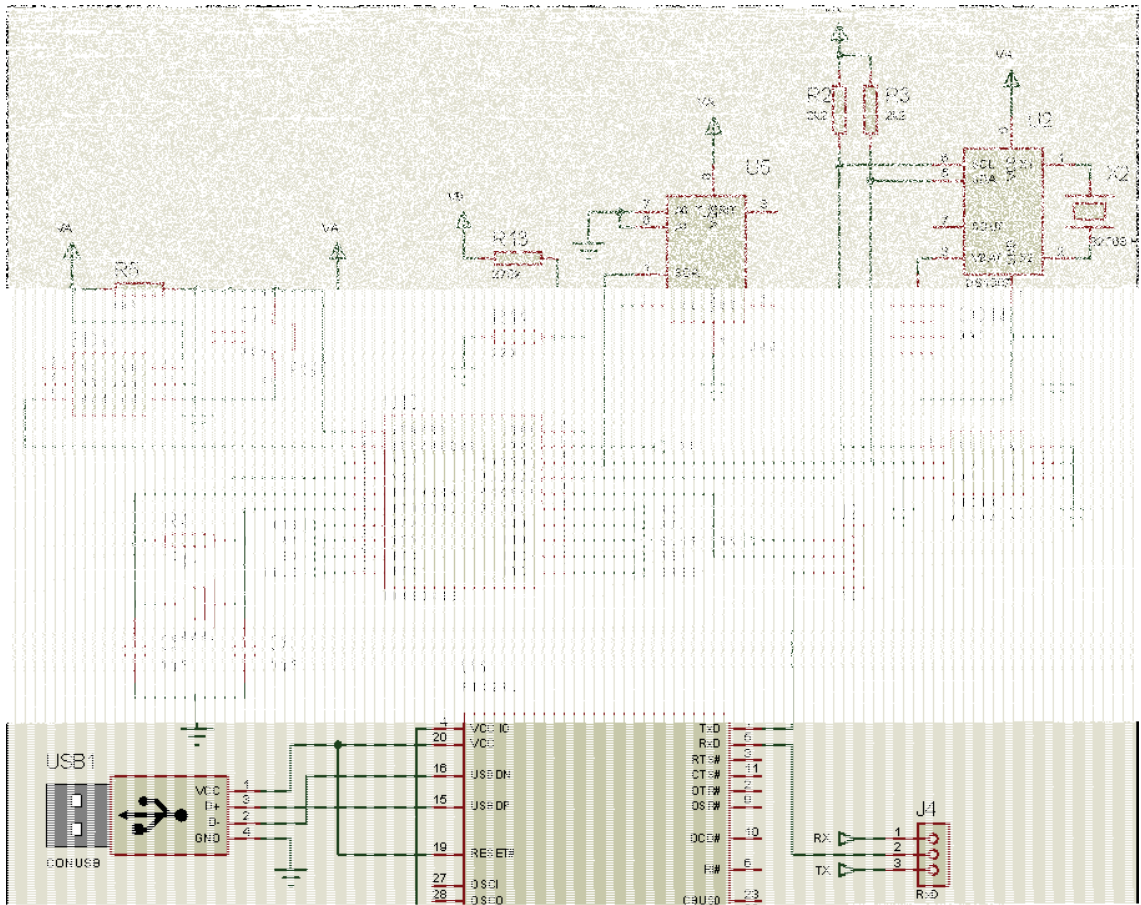


Figura 3.15 – Microprocessador HC08 e suas conexões.

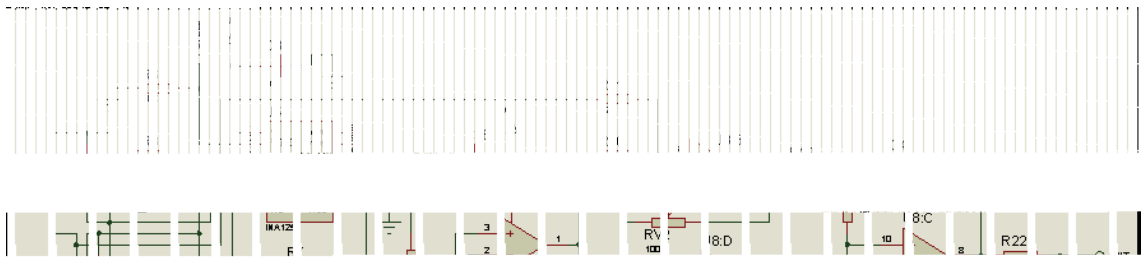


Figura 3.16 – Sensores, Amplificação pelo INA125, Off-set (RV1), Ajuste do Ganho (Calibração por RV2) e Filtro.

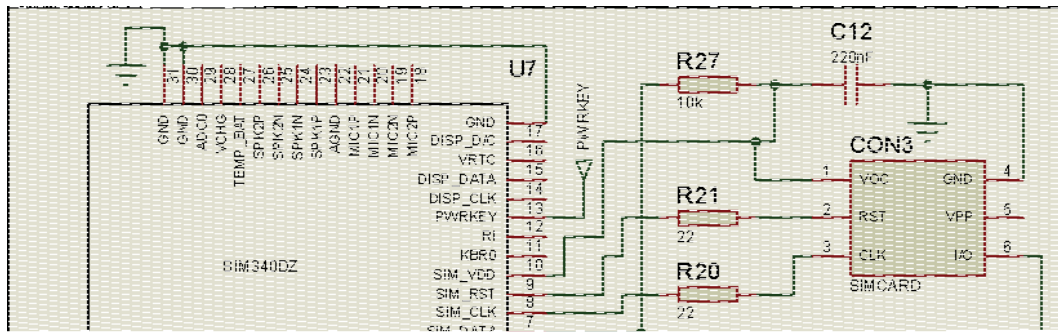


Figura 3.17 – Conexões do MODEM GPRS.

O circuito da Figura 3.17 mostra o MODEM e suas conexões de comunicação com o Microprocessador (RX, TX, CTS, RTS e PW) e as saídas para Antena (CON5-Pino1) e LED de sinalização D1.

Os circuitos da Figura 3.18 mostra o LED tricolor usado pelo Microcontrolador para comunicação visual e o circuito auxiliar de acionamento de PWRKEY (para o MODEM) a partir de PW (do Microcontrolador).

Os desenhos das placas de circuito impresso são mostrados nas figuras 3.19 (lado dos componentes) e 3.20 (lado da solda).

Neste Capítulo 3 foram então apresentadas as bases para o projeto desde seu planejamento até a implementação, a visão dos blocos funcionais do sistema, e apresentados os pontos de decisão de projeto e seus motivos principais. Os blocos funcionais foram detalhados, discutiu-se sobre a escolha do extensômetro como sensor, sobre a Ponte de Wheatstone, a etapa de condicionamento do sinal e seus ajustes, sobre a taxa de amostragem e o tratamento dos dados. O funcionamento do software foi explicado e sua visualização através das máquinas de estado do sistema. Também foi apresentado o sistema de aquisição de dados distribuído, que permite novo enfoque na detecção de vibrações pela abertura da possibilidade de aquisição concomitante de dados de linhas vizinhas ou relacionadas, o que possibilita o estudo e a análise da correlação entre essas vibrações. Foram apresentadas também a transmissão dos dados e a análise de energia, captação de energia e carga da bateria interna. Os protótipos funcional e final foram apresentados: o protótipo funcional validou individualmente os

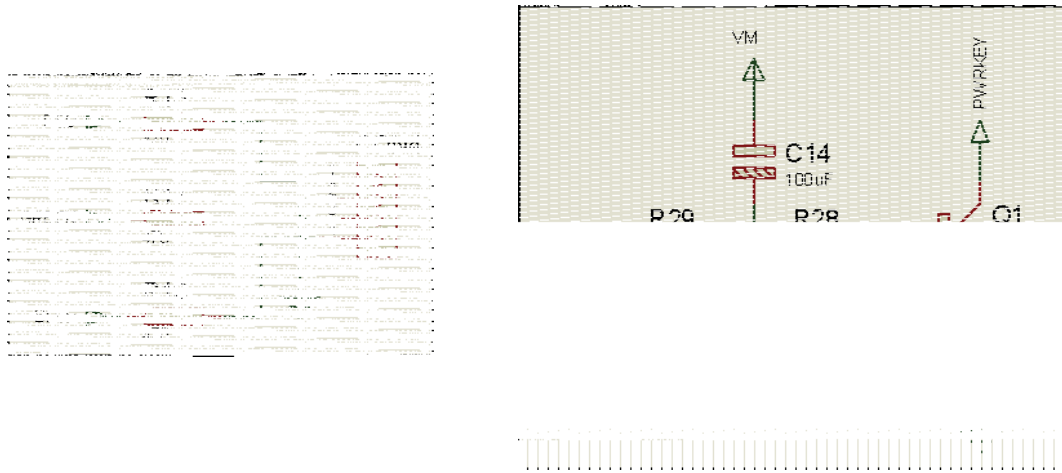


Figura 3.18 – LED tricolor do Microcontrolador e Circuito auxiliar para PW.

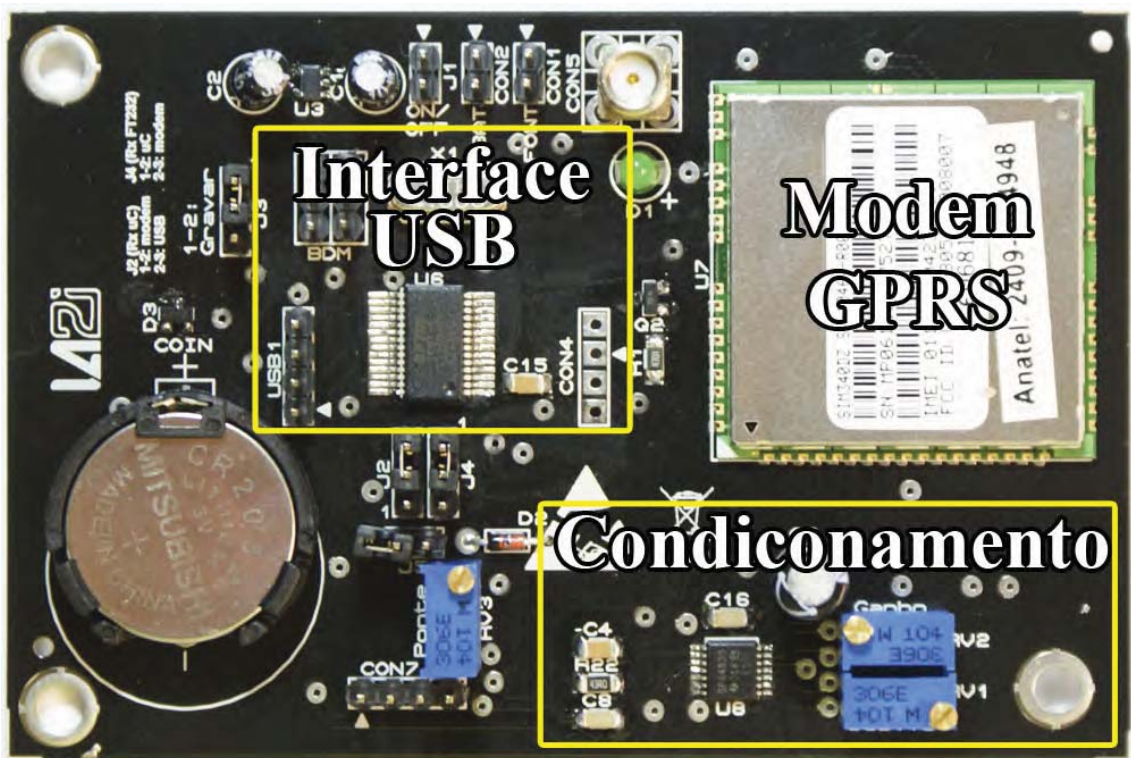


Figura 3.19 – PCB - Lado dos Componentes. Foto: o autor.

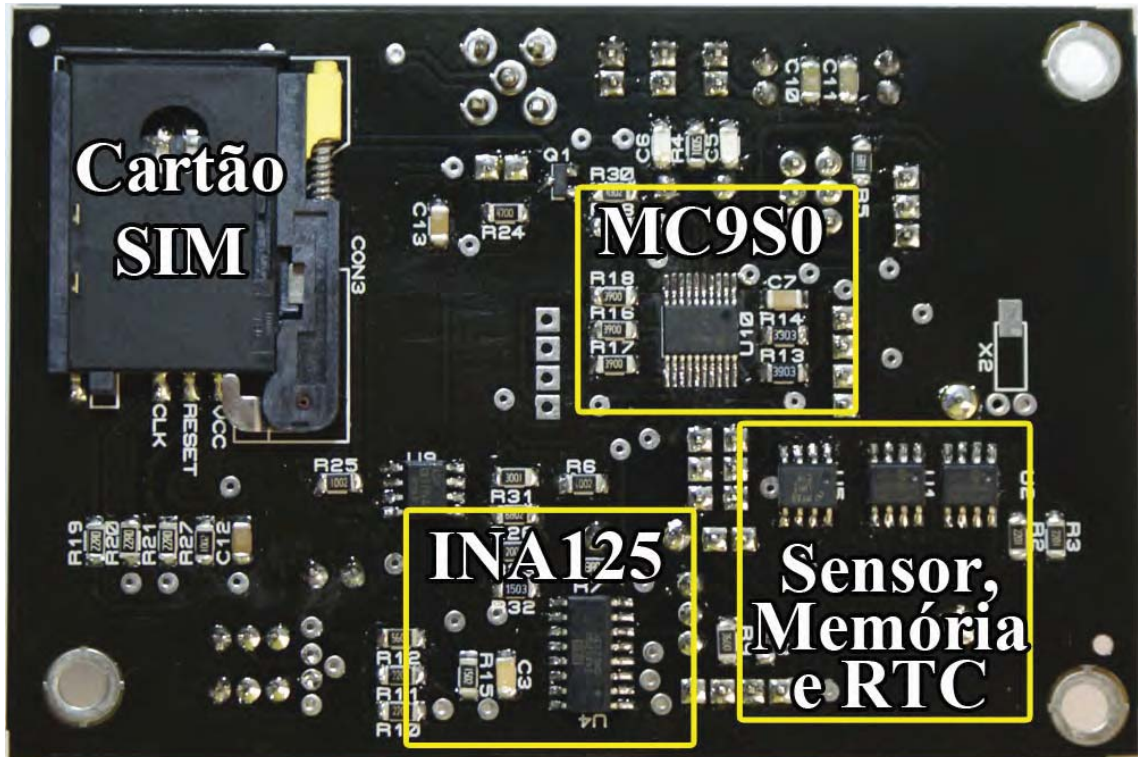


Figura 3.20 – PCB - Lado da Solda. Foto: o autor.

conceitos de cada etapa, e um protótipo final onde todas partes foram integradas, miniaturizadas e montadas em sua configuração proposta final.

No Capítulo 4, a seguir serão apresentadas as validações dos dados, verificação de linearidade da curva de transferência, apresentação da calibração do instrumento, apresentação das montagens em campo, coleta de dados e processamento dos dados conforme os requisitos da norma (IEEE, 1966).

RESULTADOS

4.1 Testes com o Protótipo Funcional

Foi projetado e montado um protótipo funcional para testes de laboratório, validações de software e as primeiras instalações em campo. Esse protótipo pesa aproximadamente 1,5 Kg, utiliza bateria de 12 volts, usa uma caixa plástica metalizada internamente, e aloja três placas de circuito impresso: placa do microcontrolador, outra do modem e uma terceira com os circuitos específicos e auxiliares. Essa montagem foi utilizada para as verificações de software, calibrações, e instalações em campo durante vários meses, entre 2010 e 2011.

4.1.1 Verificação da Linearidade da Curva de Transferência

Seguindo o padrão usual descrito por Tebo (1941), o sensor foi posicionado a 89 mm do ponto de engaste. A essa distância, representada por d_1 na Figura 4.1, o deslocamento é muito pequeno para ser lido diretamente. Para aumentar a precisão e ainda efetuar medidas por leitura direta, a haste foi prolongada até uma distância d_2 com uma barra rígida parafusada, de modo a ler o deslocamento ampliado em uma escala milimetrada (d_2) e calcular o deslocamento no sensor (d_1) por proporcionalidade. O critério para o prolongamento da haste é que seja o maior possível de modo que a rigidez desse prolongamento não introduza erros de flexão maiores que as incertezas das medições obtidas por leitura na escala.

Para efetuar a calibração, ajusta-se um parafuso no ponto de detecção, verifica-se o deslocamento ampliado na escala de leitura, calcula-se o deslocamento em d_1 por proporcionalidade de triângulos e, para esse ponto, efetua-se a leitura do nível de tensão do sinal entregue ao microcontrolador. Essa calibração supõe que a curva de transferência seja linear na faixa de interesse, o que será verificado logo a seguir.

Procedeu-se à calibração dessa curva, através do ajuste do “off-set” e do ganho, até obter uma curva de transferência que passa pelos pontos (1,00 mm; 0,17 V) e (3,00 mm; 3,13 V), respectiva-

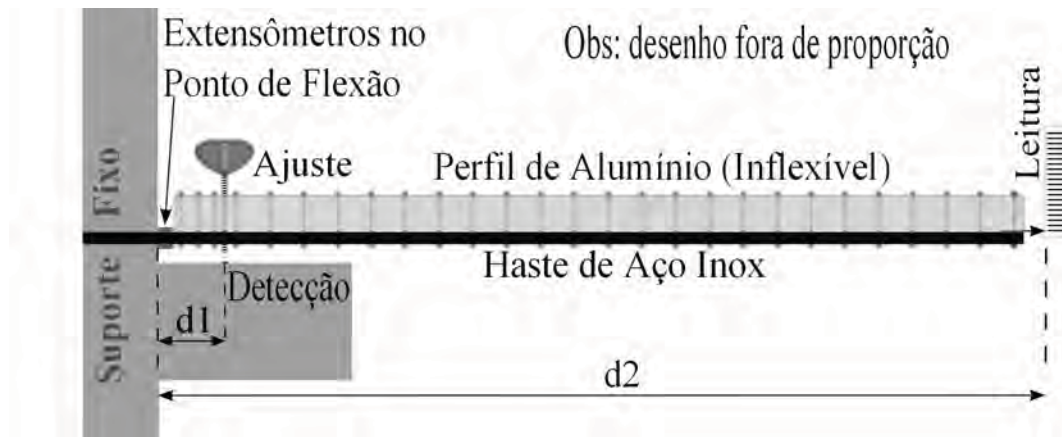


Figura 4.1 – Ampliação do deslocamento.

mente pontos mínimo e máximo definidos no projeto, cuja curva de transferência nominal é representada pela equação (4.1).

$$V = 1,48Y_b - 1,31 \quad (4.1)$$

Usando o esquema proposto, foi analisada a curva de transferência do sinal para verificação de sua linearidade. A Figura 4.2 mostra três séries de medidas de amplitude efetuadas em laboratório (pontos), e a interpolação linear (reta) pelo Método dos Mínimos Quadrados. A reta de interpolação é representada pela equação (4.2) e seu coeficiente de determinação R_2 é 0,998.

$$V = 1,48Y_b - 1,29 \quad (4.2)$$

Verificou-se que a curva apresenta boa linearidade em toda faixa, e que a reta de interpolação apresenta boa representatividade pelo seu alto coeficiente de determinação. Os erros ficaram dentro da faixa de incerteza das medições. Comparando a curva obtida (4.2) com a nominal (4.1), nota-se que o ganho é igual e o “off-set” apresenta pequena discrepância, o que não afeta as leituras diferenciais de amplitude pico-a-pico. A igualdade entre o ganho nominal e o obtido experimentalmente confirma os procedimentos de calibração do ganho.

4.1.2 Validação da Frequência

A validação do algoritmo de cálculo da frequência foi feita usando a discretização de algumas curvas conhecidas em 3.000 pontos, composições de funções do tipo senoidais com variação da amplitude como na Figura 4.3, que foram inseridas simulando uma janela de amostragem de um segundo. Para este exemplo a frequência esperada era de 16,59 Hz e o algoritmo calculou o valor de 16,5 ($\pm 0,5$) Hz. Esse e os demais resultados ficaram dentro do intervalo de incerteza do equipamento.

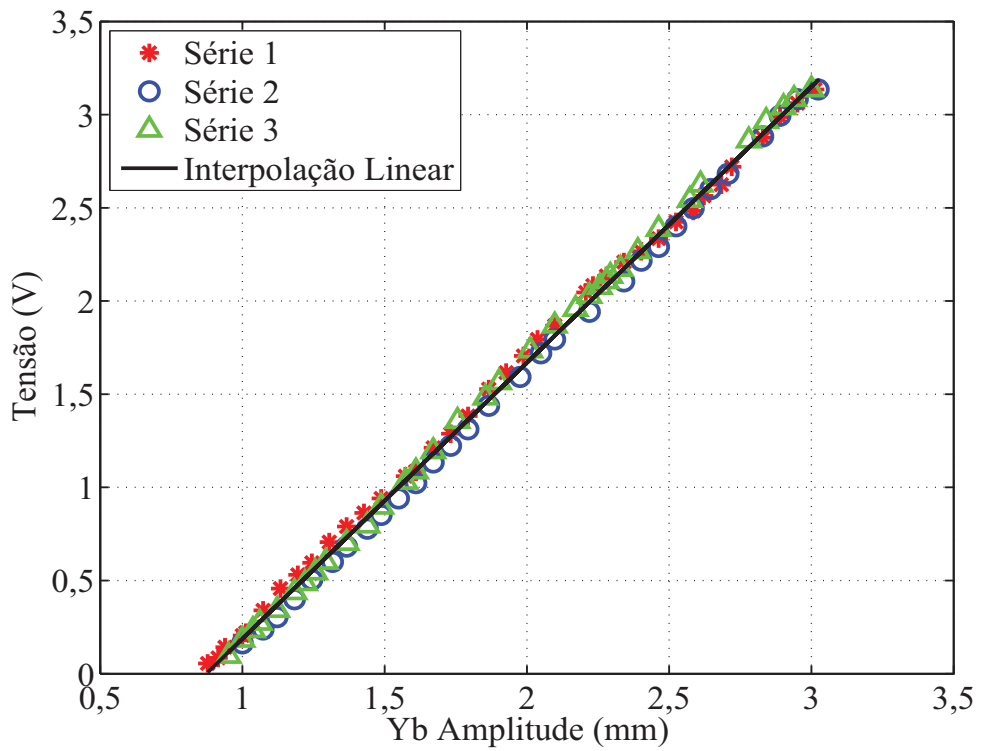


Figura 4.2 – Curva de transferência para verificação da linearidade das 3 séries de medidas.

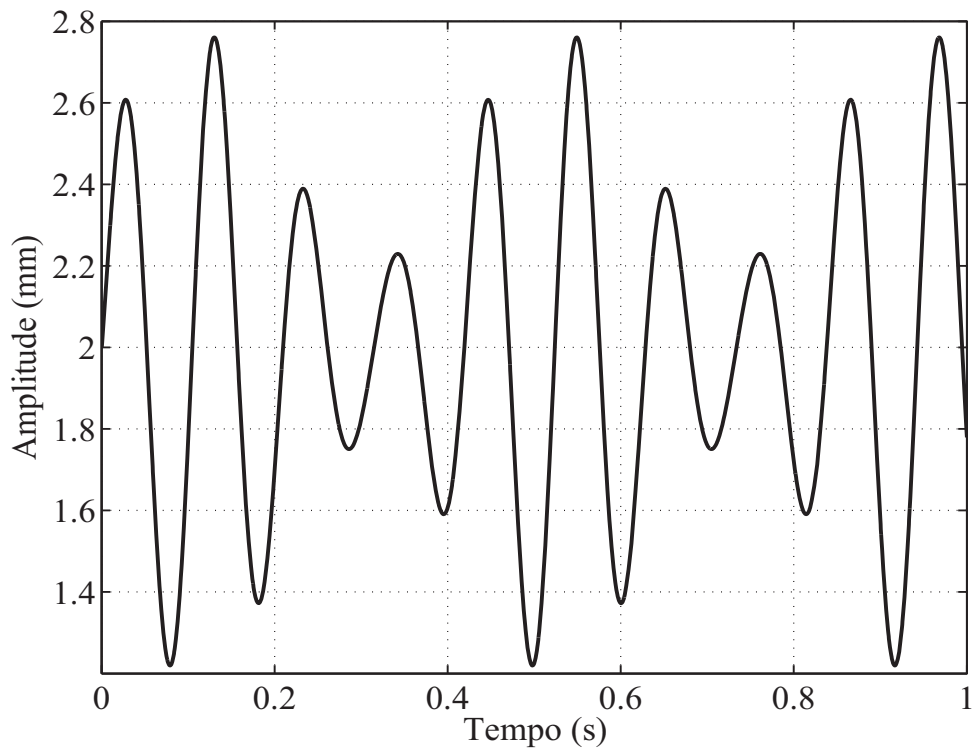


Figura 4.3 – Composição de Senos: uma das diversas curvas usadas para validação dos algoritmos.

Para os testes de laboratório, já com o equipamento todo montado, um pequeno motor desbalanceado foi preso na haste de detecção e colocado para vibrar. As frequências foram alteradas diversas vezes alterando a tensão do motor, monitoradas com osciloscópio e lidas pelo equipamento, sendo obtidas leituras sempre coerentes.

Essas medições iniciais mostraram que os valores de frequência e amplitude medidos pelo equipamento estão dentro do esperado. A janela de leitura de um segundo mostrou-se suficiente para fins de detecção de amplitudes mas, sem perda das características de projeto, esta janela normalmente é ampliada para obter o semi-período em caso de baixas frequências para aumentar a precisão dessas leituras. Os resultados obtidos nos testes preliminares foram muito satisfatórios para a amplitude e frequência de vibração e demais grandezas auxiliares monitoradas como temperatura e tensão da bateria.

4.1.3 Funcionamento em Laboratório

Após a calibração, o equipamento foi deixado ligado em laboratório, coletando amplitude e frequência durante vários dias, para verificação do preenchimento das tabelas. Para coletar dados de teste, a haste era posta a oscilar em um movimento pendular conforme sinal da Figura 4.4.

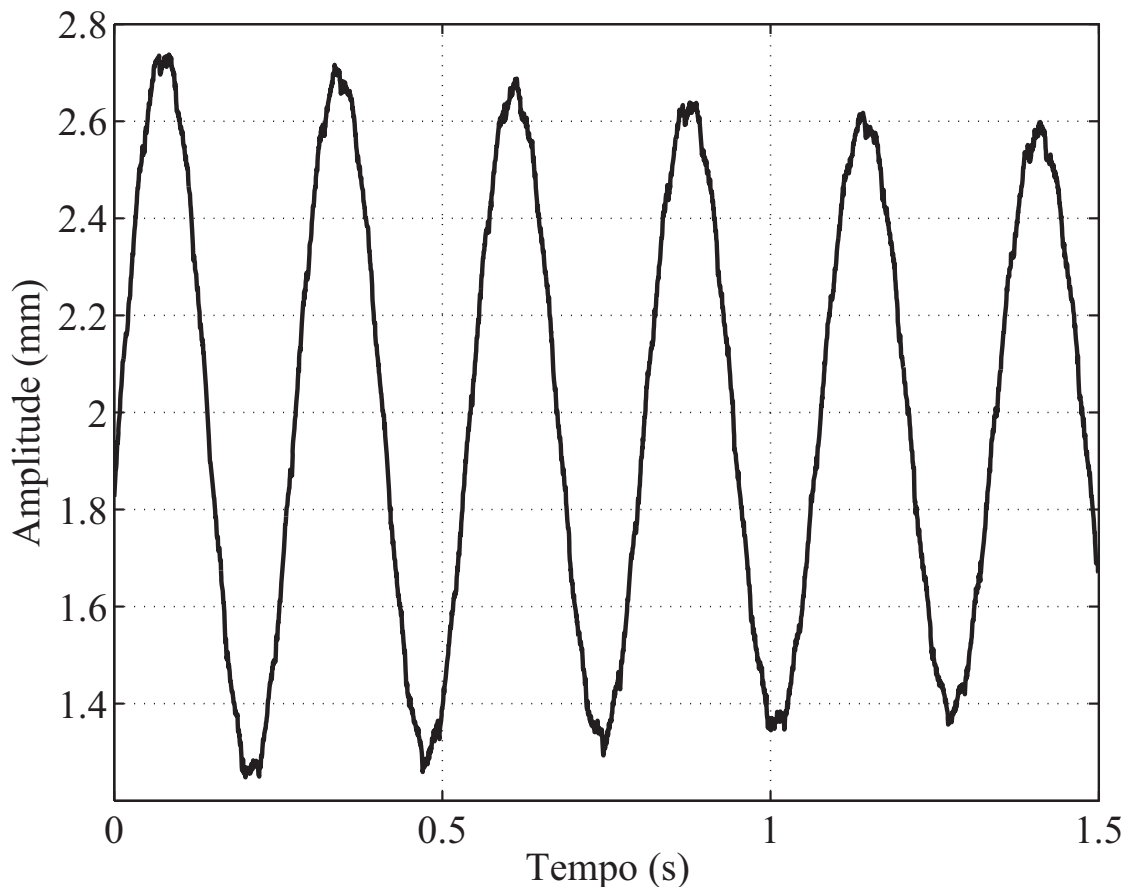


Figura 4.4 – Sinal de pêndulo oscilante.

O preenchimento da tabela foi concluído diversas vezes, sendo transmitido diariamente para o banco de dados.

A haste prolongadora fora retirada e o motor desbalanceado fora acoplado à haste do detector para leitura de vibrações durante várias semanas com variação de frequência e amplitude, sendo os dados transmitidos pelo modem GPRS e coletados no banco de dados para processamento.

4.1.4 Montagens em Campo

O equipamento foi montado em campo por várias vezes, cada uma coletando dados durante sete e quinze dias, em diversas épocas do ano. Durante os testes, foram retirados os amortecedores de vibração previamente instalados no cabo, para evitar amortecimento das vibrações. A Figura 4.5 mostra a instalação do protótipo em cabo pára-raios e a Figura 4.6 mostra a instalação do painel solar, instalados na Torre 115 da Linha Ivaiporã-Londrina II (Eletrosul - PR).



Figura 4.5 – Montagem do vibrógrafo. Foto: o autor.

As montagens foram efetuadas em cabos pára-raios por questões de logística, e também para reduzir os riscos envolvidos nos testes iniciais. Para efetuar testes em linha viva, todos componentes do sistema devem ser instalados ao mesmo potencial do cabo condutor, evitando montagens que proporcionem pontos de fuga de corrente ou que facilitem eventuais faiscamentos.



Figura 4.6 – Montagem do painel solar. Foto: o autor.

4.2 Resultados com o Protótipo Final

Como planejado, e já mencionado neste trabalho, o primeiro protótipo funcional foi utilizado para validação de conceitos preliminares, serviu para coleta de dados iniciais, teste de estruturas, análise de pontos fracos, busca de pontos de melhoria e outros aperfeiçoamentos que deveriam ser implementados no projeto final. Segundo esse planejamento, foi então projetado e montado um Protótipo Final que incorporou essas melhorias, integrou todas funcionalidades e foi montado como um equipamento final.

Na etapa final do projeto, no início de 2012, foi montado um protótipo final com diversas alterações e implementações de melhorias, conhecidas a partir da montagem do protótipo funcional inicial. O Protótipo Final foi concebido bem mais leve, pesando 750 g, utiliza quatro pequenas baterias internas recarregáveis cuja tensão totaliza 5,0 volts, usa caixa circular em PVC e aloja uma placa única de circuito impresso, que integra todas as demais placas de testes iniciais, e que executa as funções de controle, memória, regulagens, condicionamentos e filtragens do sinal, modem, comunicações, todos conectores, reguladores de potência e demais circuitos auxiliares.

Neste Protótipo Final todos circuitos eletrônicos e conectores foram posicionados em uma placa única, foi re-estruturado o projeto para racionalizar o uso de energia, a caixa do equipamento foi reduzida e montada com formatos arredondados evitando pontas agudas propensas a eventuais faiscamentos, foi reduzido o painel de recarga fotovoltaica, sendo este posicionado na horizontal, sobre o equipamento, sendo a antena colada próxima a este painel formando um conjunto quase contínuo,

e foi idealizado um conector único, que suporta a haste sensora de maneira a facilitar a montagem em posição de detecção.

A Figura 4.7 mostra o Protótipo montado em um cabo durante os testes de campo. Esta montagem foi feita somente para fins simbólicos pois, neste caso, o cabo estava somente pendurado sobre suporte não rígido, portanto os resultados dos dados não possuem significado numérico.



Figura 4.7 – Montagem do vibrógrafo (Protótipo Final) Foto: o autor.

4.2.1 Validação da Amplitude

Foi construído um “jig” de calibração como mostrado na Figura 4.8 que se constitui de um tarugo cilíndrico com diâmetro de 22,00 mm dotado de pontos de diâmetros diferentes para fins de calibração de amplitude de deslocamento. Seguindo o padrão das normas, a ponta da haste do sensor foi projetada para tocar no ponto de contato a ser monitorado a uma distância de 89 mm do ponto de engaste, medido pelo ponto médio do parafuso do conector de suspensão. Este “jig” foi construído de forma a simular 5 pontos conforme a Tabela 4.1 para calibração de modo que as leituras passem a ser efetuadas por contato físico direto, e possam calibrar as curvas de transferência internas do equipamento de forma simples e sem necessidade de outros equipamentos. A primeira coluna desta tabela mostra o diâmetro do calibrador no ponto. Para obter o valor esperado do deslocamento, divide-se o diâmetro por dois e subtrai-se o valor médio referente ao valor do diâmetro na parte que possui o mesmo diâmetro de onde está preso o conector do equipamento. Neste caso, o diâmetro da parte onde está o conector é de 22,00 mm (c). Dividindo esse valor por dois, para obter o raio, temos o valor de

referência igual a 11,00 mm. que deve ser subtraído dos demais valores para obter o deslocamento como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – 5 Pontos de Calibração para obter os deslocamentos de referência usando o “jig”

| Diâmetro / 2 = raio (mm) | raio - 11,00 = Deslocamento (mm) |
|--------------------------|---|
| a. 24,00 / 2 = 12,00 | 12,00 - 11,00 = + 1,00 = pico positivo máximo |
| b. 23,00 / 2 = 11,50 | 11,50 - 11,00 = + 0,50 = ponto positivo intermediário |
| c. 22,00 / 2 = 11,00 | 11,00 - 11,00 = = 0,00 = mesmo diâmetro do conector |
| d. 21,00 / 2 = 10,50 | 10,50 - 11,00 = - 0,50 = ponto negativo intermediário |
| e. 20,00 / 2 = 10,00 | 10,00 - 11,00 = - 1,00 = pico negativo máximo |



Figura 4.8 – Visualização do “jig”: os locais onde se posiciona a haste sensora para a calibração são representados pelas letras a, b, c, d, e, segundo seus diâmetros.

4.2.2 Instalações em Campo

Para fins de coleta de dados válidos, o equipamento foi montado em uma linha de pára-raios da Eletrosul, Linha de Transmissão Ivaiporã - Londrina II, junto à torre no lado do vão 115-2 (ré), sendo previamente retirados os amortecedores de vibração ali instalados, para detecção de sinais de vibração não amortecidos, vibrando livremente sem a presença dos amortecedores.

Os dados da Tabela 4.2 se referem a coleta de 24 horas durante época de vento moderado no

outono. Não são representativos em grande quantidade, mas servem para demonstração do método de coleta e processamento dos dados de vibração.

| | | Amplitude (mm) | | | | | | | | | |
|-----------------|----|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,025 | 0,051 | 0,076 | 0,102 | 0,127 | 0,153 | 0,178 | 0,204 | 0,229 | 0,255 |
| Frequência (Hz) | 2 | 65 | 14 | 5 | 1 | | | | | | |
| | 4 | 4 | 2 | 2 | | 1 | | | | | |
| | 6 | 2 | | | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | | |
| | 12 | | | | | | | | | | |
| | 14 | | | | | | | | | | |
| | 16 | | | | | | | | | | |
| | 18 | | | | | | | | | | |
| | 20 | | | | | | | | | | |
| | 22 | | | | | | | | | | |
| | 24 | | | | | | | | | | |
| | 26 | | | | | | | | | | |
| | 28 | | | | | | | | | | |
| | 30 | | | | | | | | | | |

Tabela 4.2 – Dados de vibração transmitidos: Cada entrada corresponde à contagem de um evento de vibração para a amplitude e frequência determinadas. Dados obtidos na Linha Eletrosul - Ivaiporã-Londrina II, Torre 115-2, Vão Gravante 660 m., Cabo pára-raios, lado leste - Período: 30/05/11 12:15 a 31/05/11 12:00.

4.2.3 Processamento dos Dados

A partir desses dados de vibração colhidos, seguindo as diretrizes da norma (Fritz et al., 1966), obtêm-se os gráficos de amplitude máxima por intervalo de frequência de vibração mostrado na Figura 4.9, distribuição as oscilações por intervalo de frequência na Figura 4.10, e vibração cumulativa por faixa de amplitude na Figura 4.11.

Esses resultados devem ser analisados em comparação com as curvas-limite segundo as metodologias apresentadas para obtenção do impacto de fadiga sobre a vida útil do cabo na região monitorada. Os cálculos de fadiga a partir dos dados coletados e análise dos métodos não estão no escopo deste presente trabalho.

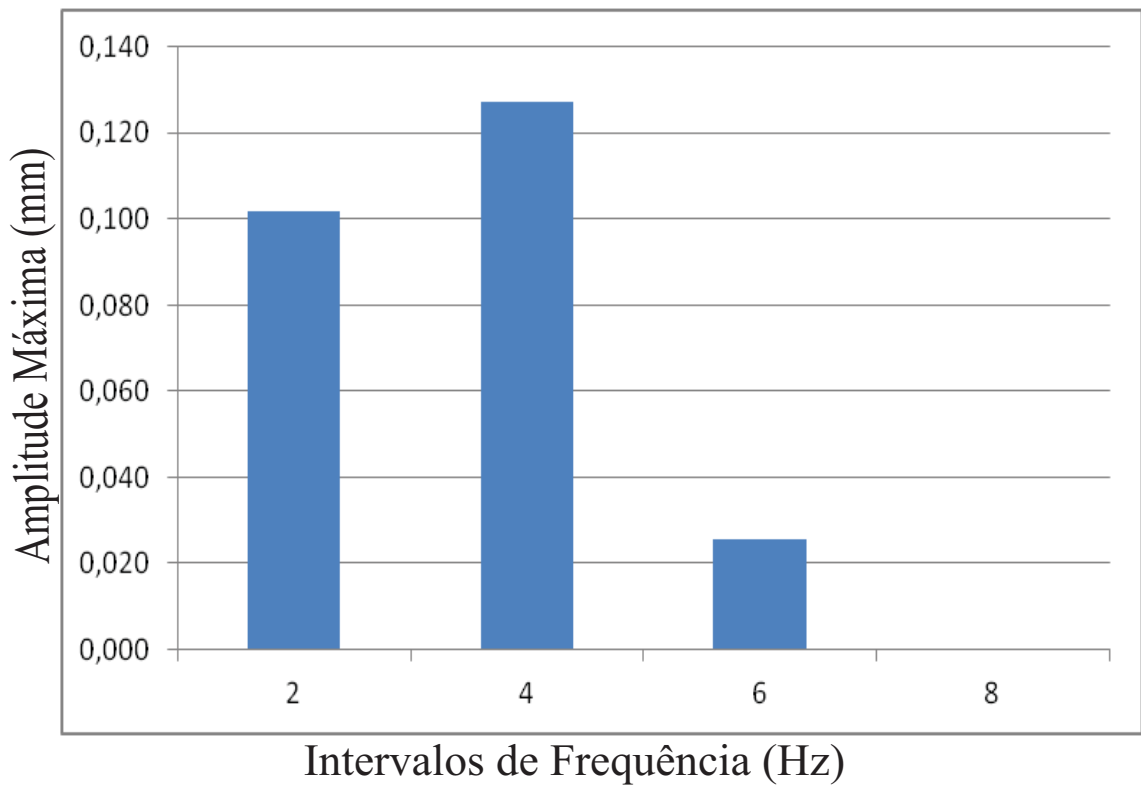


Figura 4.9 – Amplitude máxima por intervalo de frequência.

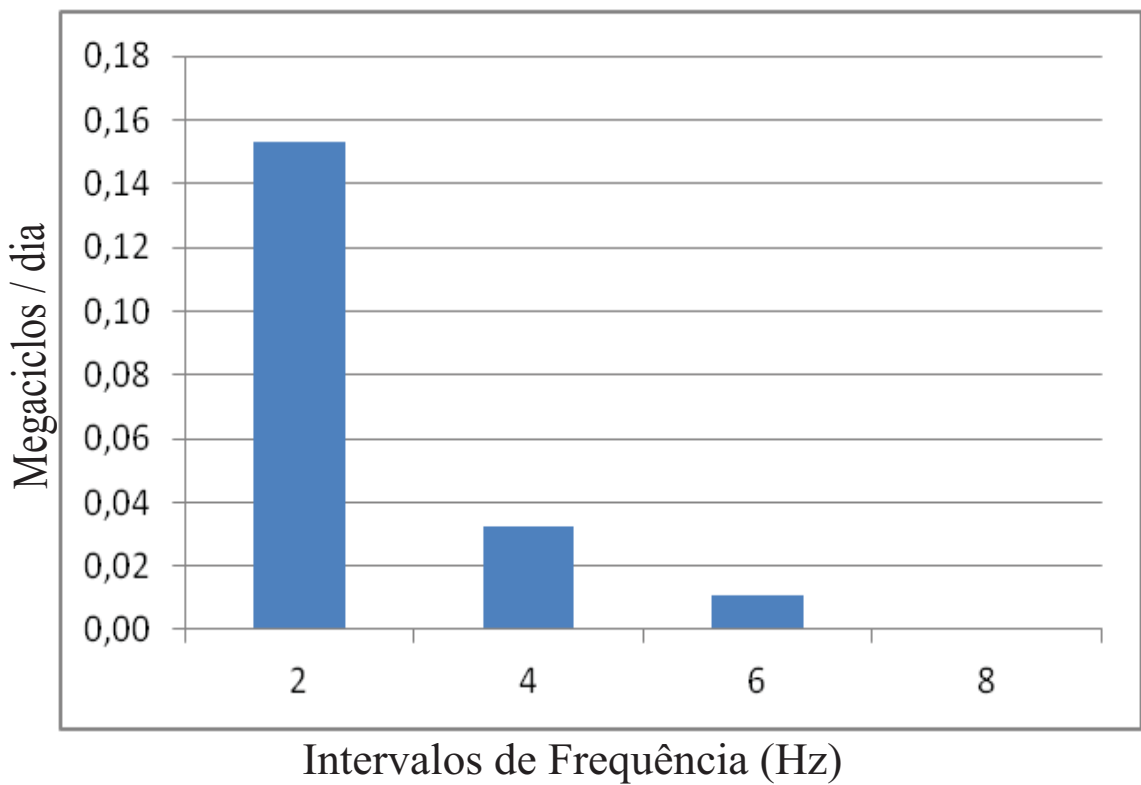


Figura 4.10 – Distribuição por frequência.

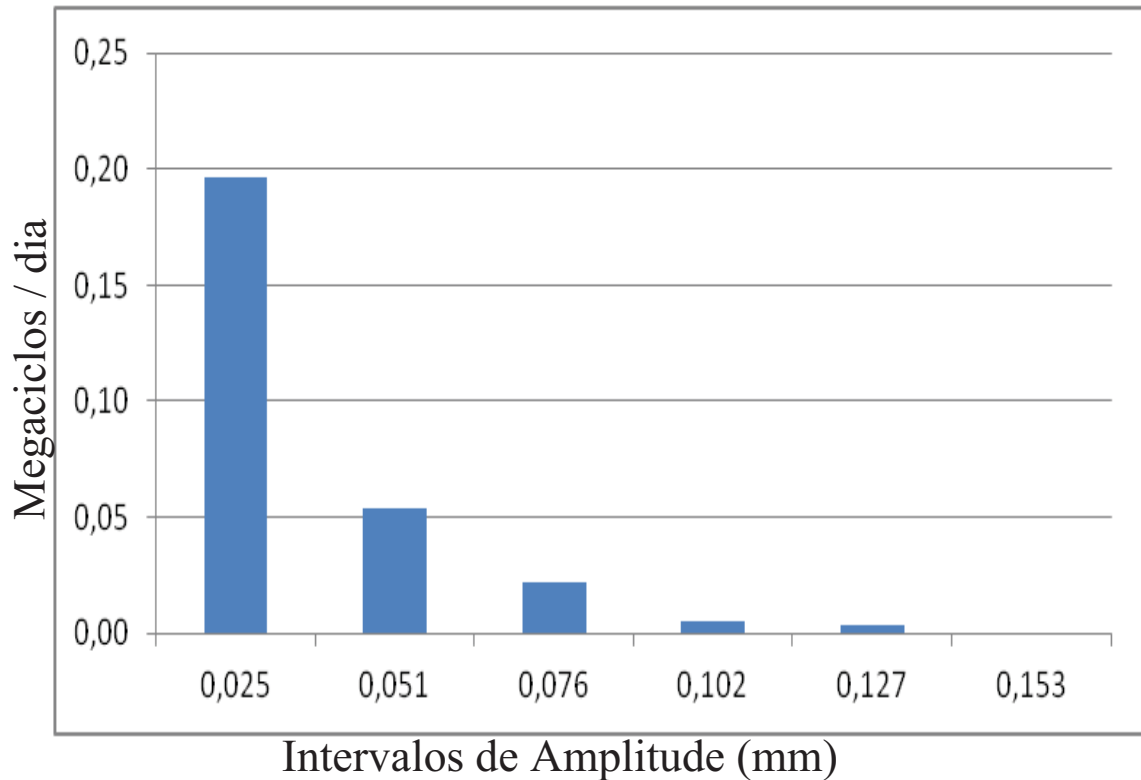


Figura 4.11 – Vibração Cumulativa.

4.2.4 Validações Complementares

O primeiro protótipo funcional foi retirado de campo e continuou em funcionamento no laboratório. O Protótipo Final está sendo preparado para continuidade das pesquisas visando testes sob condições extremas de temperatura (bem baixas e muito altas) para certificação dos conceitos do projeto. Os próximos passos também incluem a montagem de um exemplar do Protótipo Final em uma linha viva, para verificação do funcionamento ou busca de pontos de queima devido a faiscamentos. Também devem ser efetuadas mais leituras comparativas com alguns equipamentos já existentes no mercado para verificação das similaridades e análise de eventuais discrepâncias. Como o equipamento implementa a monitoração segundo métodos e processos já conhecidos, não são esperadas discrepâncias nas medidas comparativas.

4.2.5 Pesquisas e Futuras Implementações

Com pequenas adaptações, ainda podem abrir novas oportunidades de pesquisa como monitoração de vibrações em tempo real, ou análise de dados concomitantes provenientes de vários cabos ou regiões de linhas. Isso permitirá a amostragem por intervalos mais longos ou sem limites pré-definidos. Outros campos de análise podem surgir com a busca de correlação entre vibrações de cabos vizinhos ou em vãos subsequentes. Evoluções imediatas também poderão ser implementadas em análises comparativas dos resultados conforme os métodos utilizados, integração histórica dos

impactos de fadiga sobre o tempo de vida útil de uma região do cabo, análises das incertezas dessas estimativas e orientações para o uso prático dos resultados. Com a experiência adquirida, cabe também um trabalho de orientações sobre como evitar os principais erros nas coletas de dados de vibração em campo de acordo com o tipo de detectores utilizados, e orientações sobre otimização de instalação de amortecedores de vibração.

Neste Capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos com o protótipo funcional, foi verificada a linearidade da curva de transferência para validação do pressuposto de que a amplitude medida era linearmente proporcional ao sinal digitalizado que se utiliza para processamento, a validação das medições de frequência pelo software do equipamento, e apresentadas as montagens de campo. Os primeiros resultados foram obtidos com o protótipo funcional, e a seguir foram apresentados os resultados obtidos com o protótipo final, montados em campo. O protótipo final incorporou um calibrador para ajuste e conferência da amplitude de oscilação. A partir dos dados obtidos, foram calculadas as curvas teóricas intermediárias para obtenção das amplitudes máximas de oscilação ou para a integração das oscilações para analisar o impacto de fadiga utilizando os métodos de análise apresentados no Capítulo 2. São apresentados também sugestões para pesquisas e futuras implementações a serem efetuadas a partir do equipamento e resultados obtidos no presente trabalho.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises dos resultados e a conclusão que se permite obter com as implementações propostas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O Sistema proposto mostrou-se muito viável, prático e de ampla aceitação pelas equipes de manutenção de linhas de transmissão. As propostas iniciais foram implementadas com sucesso e as incertezas dos resultados não são fatores restritivos à análise de fadiga que podem ser obtidas usando os dados coletados com o equipamento. O conhecimento adquirido e os equipamentos já montados também permitirão a continuidade das pesquisas no laboratório LA2I da UEL. Os objetivos propostos foram cumpridos e o plano de execução do projeto em duas etapas, a inicial de protótipo funcional e a última do Protótipo final também foi considerado como uma decisão acertada pois permitiu maior absorção de conhecimentos de projeto nas áreas envolvidas.

Bibliografia

- Azevedo, C. R. F., Henriques, A. M. D., Filho, A. R. P., Ferreira, J. L. A., e Araújo, J. A. (2009). Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. *Engineering Failure Analysis* 16, pp. 136–151.
- Baenziger, M., James, W., Wouters, B., e Li, L. (1994). Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1):40–49.
- Braga, G., Nakamura, R., e Furtado, T. (2004). Aeolian vibration of overhead transmission line cables: endurance limits. Em *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, pp. 487–492.
- Brunair, R., Ramey, G., e Duncan, R.R., I. (1988). An experimental evaluation of s-n curves and validity of miner's cumulative damage hypothesis for an acsr conductor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1131–1140.
- Childress, D. H. (2004). *As Fantásticas Invenções de Nikola Tesla*. São Paulo, Madras Editora.
- CIGRÈ (1979). Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. *Electra*, 63(WG 04 SC 22-02).
- CIGRÈ (1995). Guide to vibration measurements on overhead lines. *Electra*, 162(TF 2 WG 11 SC 22).
- Cloet, E. e Lilien, J.-L. (2011). Uprating transmission lines through the use of an innovative real-time monitoring system. Em *Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), 2011 IEEE PES 12th International Conference on*, pp. 1–6.
- de Souza Junior, O. H. (2010). *Vibrações em Cabos Aéreos de Linhas de Transmissão - Estudo Teórico e Experimental por Meio de Modelos Lineares e Não Lineares*. Pontifícia Universidade Católica do Paraná - Curitiba, Tese de Doutorado.
- Deutsch, P. (1996). GZIP file format specification version 4.3. Internet RFC 1952 (<http://tools.ietf.org/html/rfc1952>). Acessado em 01 de setembro de 2011.
- Diana, G., Boccione, M., Cheli, F., Cigada, A., e Manenti, A. (2005). Large wind-induced vibrations on conductor bundles: Laboratory scale measurements to reproduce the dynamic behavior of the spans and the suspension sets. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 20-2, pp. 1617–1624.
- dos Anjos, T. A. (2012). História da eletricidade. <http://www.mundoeducacao.com.br/fisica/a-historia-eletricidade.htm>. Acessado em 15 de maio de 2012.

- dos Santos, A. S. (2008). Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Engenharia Mecânica, Pará, Brasil.
- EPRI, E. P. R. I. (1979). *Wind Induced Conductor Motion*. EPRI Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- Fritz, E., Edwards, A. T., Hard, A. R., Pfitzer, A. C., Rawlins, C. B., Ruhlman, J., e Smith, J. (1966). Standardization of conductor vibration measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-85(1):10–22.
- Godard, B., Guerard, S., e Lilien, J.-L. (2011). Original real-time observations of aeolian vibrations on power-line conductors. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 26-4, pp. 2111–2117.
- Gorn, M. H. (1992). *The Universal Man, Theodore von Karman, Life in Aeronautics*. Smithsonian Institution's Press, Washington.
- Guo-hua, Y., Long, X., Rong, Y., Ju, Z., e Teng-fei, Z. (2011). Hardware design of one transmission line aeolian vibration monitoring system. Em *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on*, pp. 4007–4010.
- Hoepfner, D. W. (1994). Mechanisms of fretting fatigue. Em *Fretting Fatigue*, ed. Waterhouse, R. B., and Lindley, T.C., Mech. Eng, Publ., London.
- Hong-Wei, Q. e He, Z. (2010). Vibration ice-shedding measurement from wire lines on the basis of binocular vision method. Em *Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), 2010 3rd International Conference on*, pp. 96–99.
- Hubbell, V. D. (USA, 2006). *Transmission Connectors: 4R Stockbridge Vibration Dampers / Spacers*. Hubbell Power Systems Inc.
- Ibrahim, D. e Ibrahim, A. (2010). *Microcontroller Based GSM/GPRS Projects: Advanced Microcontroller Projects*. VDM Verlag Dr. Müller. ISBN-10 3639249100.
- IEEE (1966). Standardization of conductor vibration measurements. *IEEE PAS*, 85(1):10–22.
- IEEE (2006). Guide for aeolian vibration field measurement of overhead conductors. *IEEE Std 1368-2006*, pp. 1–35.
- Karman, T. V. (1912). *Flussigkeits und Luftwiderstand*. Physikalische Nachrichten, Germany.
- Koepfinger, J. L. (1980). Guide on the measurement of the performance of aeolian vibration dampers for single conductors. *IEEE STD-664*.
- Krispin, H., Fuchs, S., e Hagedorn, P. (2007). Optimization of the efficiency of aeolian vibration dampers. Em *PowerAfrica 2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa*, volume 1-1, pp. 1–3.
- Lu, M. e Chan, J. (2007). An efficient algorithm for aeolian vibration of single conductor with multiple dampers. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 22(3):1822–1829.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Proc. ASME, Journal of Applied Mechanics*. p.159.
- Mourão, M. (2005). Cabos e emendas de linhas de transmissão de energia. Em *Na Busca das*

- Melhores Soluções de Engenharia, Informe Tecnológico N. 24, CEMIG, Brasil.*
- Newham, C. e Rosenblatt, B. (2005). *Learning the bash shell*. O'Reilly Media, Inc.
- Nogueira, M. M., Morikawa, S. R. K., Valente, L. C. G., e Braga, A. M. B. (2006). Metrological evaluation of an optical fiber accelerometer for power transmission lines monitoring. Em *XVII IMEKO World Congress*, volume 1-1, pp. 1–5, Rio de Janeiro, Brasil.
- ONS (2012). *Sistema Interligado Nacional (SIN)*. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Brasil. nov, 2012. URL: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx.
- Pan, L. e Xiao, X. (2009). Image recognition for on-line vibration monitoring system of transmission line. Em *Electronic Measurement Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on*, pp. 3–1078 –3–1081.
- PLP (2006). *Vibração Induzida Pelo Vento*. PLP, Produtos para Linhas Preformados Ltda. Brasil.
- Poffenberger, J. C. e Swart, R. L. (1965). Differential displacement and dynamic conductor strain. Em *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, volume 84(4), pp. 281–289.
- Rawlins, C. (1997). Some effects of mill practice on the stress behavior of acsr. Em *IEEE Transactions on Power Delivery*, PE-325-PWRD-0-12-1997.
- Richardson, A.S., J. (1995). Vibration damping required for overhead lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2):934–940.
- RocTest, P. (2005). *Transmission Line Vibration Recorder and Analyser*. Product Specification Model Pavica, RocTest Limited.
- Roesslein, J. (2011). Tweepy: Twitter API library for Python. <http://code.google.com/p/tweepy/>. Acessado em 01 de setembro de 2011.
- Rolim, A. L. (2009). Contribuições para o estudo das tensões mecânicas em cabos de linhas de transmissão induzidas por vibrações eólicas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Engenharia Civil, UFPA, Belém, Pará, Brasil.
- Ronan, C. A. (1987). *História Ilustrada da Ciência: Universidade de Cambridge*. 1 ed. São Paulo: Círculo do Livro, 1987. Vol III - Da Renascença à Revolução Científica.
- Schmidt, J., Biedenbach, G., e Krispin, H. (1997). Laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4):1614–1621.
- Shafranovich, Y. (2005). Common format and MIME type for comma-separated values (CSV) files. Internet RFC 4180 (<http://tools.ietf.org/html/rfc4180>). Acessado em 01 de setembro de 2011.
- Tan, U.-X., Veluvolu, K., Latt, W. T., Shee, C. Y., Riviere, C., e Ang, W. T. (2008). Estimating displacement of periodic motion with inertial sensors. *IEEE Sensors Journal*, 8(8):1385–1388.
- Tebo, G. B. (1941). Measurement and control of conductor vibration. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 60(12):1188–1193.
- Thomas J. Alderton (2006). *IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurement of Overhead Conductors*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Vilela, L. R. (2012). História da eletricidade. <http://www.mundociencia.com.br/fisica/eletricidade/historiaeletricidade.htm>. Acessado em 15 de maio de 2012.

- Wang, J. (2008). Overhead transmission line vibration and galloping. Em *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, volume 1, pp. 120–123.
- Wikipedia (2012). Eletricidade. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Eletricidade>. Acessado em 15 de maio de 2012.
- Zhao, G., Wang, L., Cheng, S., e Zhang, J. (2011). Design and realization of a mobile robot for power transmission lines inspection. Em *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, pp. 1509–1514.