

**HELTON FERNANDO DOS SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
MONITORAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO  
CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

**Florianópolis  
2016**







Helton Fernando dos Santos

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
MONITORAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO  
CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela Dr.  
Coorientador: Prof. Nelson Sadowski Dr.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Helton Fernando dos  
Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo / Helton Fernando dos Santos ; orientador, Nelson Jhoe Batistela ; coorientador, Nelson Sadowski. - Florianópolis, SC, 2016.  
110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Monitoração de máquinas elétricas. 3. Instrumentação para campo magnético. 4. Análise de faltas em geradores síncronos. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Sadowski, Nelson. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

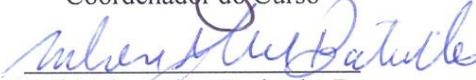
Helton Fernando dos Santos

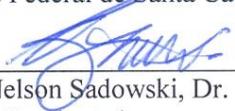
**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
MONITORAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO  
CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de fevereiro de 2016.

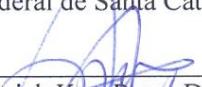
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.  
Coordenador do Curso

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Nelson Jhoé Batistela, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Pedro Armando da Silva Júnior, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Laurent Didier Bernard, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## RESUMO

Atualmente, os geradores síncronos produzem praticamente toda a energia elétrica consumida no país. Por se tratar de um ativo importante às empresas geradoras de energia elétrica, sua monitoração a fim de programar manutenções preventivas e preditivas fornece segurança nas operações e aumenta o grau de confiabilidade do sistema elétrico. Neste trabalho, desenvolveu-se um equipamento para monitoração destas máquinas através do campo magnético externo. Para o desenvolvimento do equipamento utilizou-se *hardware* e *software* apropriados para tratar sinais de baixíssimas amplitudes. O objetivo do equipamento é registrar eventos que aconteçam no gerador síncrono que podem advir de faltas incipientes na máquina. Apresenta-se uma descrição do desenvolvimento do equipamento bem como resultados obtidos com uma versão inicial do equipamento instalada na usina hidroelétrica de Itá. Medições efetuadas em uma bancada na universidade e com o equipamento instalado na usina de energia elétrica são apresentadas e discutidas.

**Palavras-chave:** geradores síncronos, detecção de faltas, manutenção preventiva, campo magnético.



## ABSTRACT

Nowadays, synchronous generators produce roughly the electricity consumed in the country. Because it is an important asset to companies that generate electricity, its monitoring to schedule preventive maintenance provides security operations and enhances the reliability of the electrical system. In this work, we developed a device for monitoring these machines through the external magnetic field. For the development of the equipment used is appropriate hardware and software to handle signals of very low amplitude. The purpose of the equipment is to record events that occur in the synchronous generator that can come of incipient faults in the machine. It presents a description of the development of the equipment as well as results with an early version of the equipment installed in a hydroelectric power plant. Measurements made on a workbench at the university and with the equipment installed in the power plant are presented and discussed.

**Keywords:** synchronous generators, fault detection, preventive maintenance, magnetic field.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Primeiro gerador trifásico construído (foto do museu em Munique, Alemanha) .	19
Figura 2: Ilustração do sistema desenvolvido com uma possível configuração de instalação.	22
Figura 3: Ilustração dos pontos de concentração de fluxo magnético em uma máquina elétrica.	26
Figura 4: Armário ZOOM	27
Figura 5: Unidade de processamento.	27
Figura 6: Vibração nas cabeças de bobina.	28
Figura 7: Vibração do núcleo do estator, deslocamento axial & radial do mancal de guia, vibração da caixa espiral, vibração no tubo de sucção, vibração no bulbo.	28
Figura 8: Deslocamento radial do eixo, deslocamento axial & deslocamento da carcaça do estator.	28
Figura 9: Vibração das barras do estator.	29
Figura 10: Sensor TFProbe.	30
Figura 11: Central de processamento.	30
Figura 12: Diagrama em blocos do sistema.	30
Figura 13: Diagrama radial de amplitudes utilizado pelo sistema.	31
Figura 14: Bobina sonda de núcleo de ar.	33
Figura 15: Bobina sonda das unidades de monitoramento.	34
Figura 16: Sensor HMC5883L.	35
Figura 17: Sensor AMR na placa de monitoramento - detalhe.	35

Figura 18: Placa de condicionamento analógico. ....	37
Figura 19: Diagrama de fluxo do condicionamento do sinal. ....	38
Figura 20: Esquemático simplificado das chaves com a rede de resistores. ....	39
Figura 21: Curva de ganhos obtida com a rede de resistores implementada. ....	40
Figura 22: Foto do componente ADS8317. ....	41
Figura 23: Conversor A/D na placa de monitoramento. ....	42
Figura 24: Caixa da unidade de monitoramento (vista interna). ....	43
Figura 25: Painel elétrico do sistema da central de processamento. ....	45
Figura 26: Vista interna do painel e descrição dos componentes. ....	46
Figura 27: Foto da placa de interface e descrição dos circuitos integrados. ....	48
Figura 28: Estados lógicos da linha de fibra óptica. ....	50
Figura 29: Sequência de comando Central para Unidade. ....	51
Figura 30: Comando de retorno das amostras para a central. ....	52
Figura 31: Estado ocupado da unidade após solicitação de aquisição pela central. ....	53
Figura 32: Sequência de recepção Unidade para Central. ....	54
Figura 33: Sinais do decodificador de <i>bits</i> para carregamento de dois <i>bits</i> . ....	55
Figura 34: Painel do equipamento: vista externa. ....	56
Figura 35: Placa mãe da unidade de monitoramento com indicação dos componentes. ....	59
Figura 36: Verso da placa da unidade de monitoramento. ....	60
Figura 37: Circuito da fonte na unidade. ....	61

Figura 38: Circuito digitalizador do sinal analógico.....	62
Figura 39: Diagramas dos circuitos de fibra óptica.....	63
Figura 40: Circuito comutador do transmissor de fibra óptica.....	64
Figura 41: Núcleo de processamento e armazenamento. ....	64
Figura 42: Circuito medidor de campo DC.....	65
Figura 43: Fluxograma do <i>software</i> no <i>firmware</i> do microcontrolador. ....	68
Figura 44: Sensor posicionado em um ponto específico da carcaça. ....	72
Figura 45: Sinal medido em uma máquina sadia. ....	73
Figura 46: Sinal medido em uma máquina com os polos 3 e 4 defeituosos.....	73
Figura 47: Fluxograma do algoritmo. ....	75
Figura 48: Fluxograma do algoritmo. ....	76
Figura 49: Arquivo de histórico. ....	78
Figura 50: Campo magnético no domínio do tempo. ....	80
Figura 51: Aba histórico. ....	81
Figura 52: Controle para escolha da frequência.....	81
Figura 53: Aba Medição de campo e operação. ....	82
Figura 54: Arquivo de aquisições do vetor de tensão. ....	84
Figura 55: Fluxograma geral do programa. ....	85
Figura 56: Painel da central de processamento instalado em uma unidade geradora. ....	87
Figura 57: Unidade de monitoramento instalado em uma usina hidroelétrica. .	88

Figura 58: Diagrama de localização da unidade no gerador. ....	88
Figura 59: Orientação da bobina sonda em relação a parede externa do gerador. .....	88
Figura 60: Gráfico de erro em função da frequência. ....	93
Figura 61: Assinatura magnética até 200Hz no gerador síncrono instalado. ....	94
Figura 62: Assinatura magnética até 3000 Hz. ....	95
Figura 63: FFT do sinal de campo magnético do lado externo do <i>housing</i> do gerador.....	95
Figura 64: Alteração capturada por volta das 11h29min de 11/11/2015 .....	96
Figura 65: Alteração capturada por volta das 7h06min de 12/11/2015 e outro evento por volta de 7h35min do mesmo dia (fundamental mecânica na cor branca, 4,28 Hz na cor vermelha). ....	97
Figura 66: Alteração capturada por volta das 20h06min de 11/11/2015 até 20h36min do mesmo dia (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho).....	98
Figura 67: Evento capturado por volta das 23h31min de 11/11/2015 (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho). ....	98
Figura 68: Evento capturado as 23h31min do dia 11/11/2015 foi até cerca 1h43min do dia seguinte (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho). .....	99
Figura 69: Diagrama de orientação do sensor em relação ao gerador.....	100
Figura 70: Curto de chapa inserido. Comportamento da componente de 862,5 Hz. ....	100
Figura 71: Curto de chapas e de espiras da fase B (862,5 Hz).....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	<i>Analogue/Digital</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
AMR	<i>Anisotropic Magneto-Resistive</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CI	Circuito Integrado
CRIO	<i>CompactRIO</i>
dB	Decibéis
DC	<i>Direct Current</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
ID	Identificador Digital
IHM	Interface Homem-Máquina
kSps	<i>Kilo Samples per Second</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MS	Máquina Síncrona
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PD ou P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PID	Proporcional-Integral Derivativo
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
RT	<i>Real Time</i>
SPDIF	<i>Sony/Philips Digital Interface Format</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Serial Random Access Memory</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Rastreamento das frequências entre 70 e 110 Hz.....	90
Tabela 2: Rastreamento de componentes harmônicas entre 1 e 61 Hz. ....	92

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	17
1.1 O gerador trifásico: história.....	18
1.2 O gerador trifásico: princípio de funcionamento.....	19
1.3 Objetivos do trabalho.....	20
1.4 Metodologias utilizadas.....	21
1.5 Estrutura do trabalho.....	23
2. Contextualização do trabalho.....	25
2.1 Estudos realizados para detecção de faltas utilizando sensores de entreferro.....	25
2.2 Campo magnético externo a geradores síncronos.....	25
2.3 Sistemas VibroSystM.....	26
2.4 Equipamento Flux TracII da empresa Iris Power.....	29
2.5 Considerações finais do capítulo.....	31
3. Sistema de medição, condicionamento e conversão analógico/digital dos sinais de campo magnético.....	33
3.1 Elementos sensores.....	33
3.1.1 Sensor de indução.....	33
3.1.2 Sensor AMR.....	34
3.2 Amplificador e filtro.....	36
3.3 Chaves seletoras de ganho (U1 e U2).....	38
3.3.1 Determinação dos valores de resistores da rede.....	40
3.4 Conversor A/D.....	40
3.5 Considerações finais do capítulo.....	42
4. Central de processamento do equipamento desenvolvido.....	45
4.1 HD externo.....	46
4.2 CompactRIO.....	46
4.3 Interface homem-máquina (IHM).....	47
4.4 Comunicação entre a central de processamento e as unidades de monitoramento.....	47
4.4.1 Placa de interface.....	47
4.4.2 Protocolo de comunicação serial desenvolvido.....	49
4.4.3 Placa de Sinalização.....	56
4.5 Quadro de comando do painel.....	56
4.6 Considerações finais do capítulo.....	57
5. Unidades de monitoramento.....	59
5.1 Fonte.....	61
5.2 Circuito amostrador e digitalizador do sinal analógico.....	61

5.3	Circuitos eletrônicos de comunicação por fibra óptica.....	62
5.4	Circuito comutador do transmissor de fibra óptica.....	63
5.5	Núcleo de processamento e armazenamento.....	64
5.6	Circuito medidor de campo DC.....	65
5.7	Software do microcontrolador ( <i>firmware</i> ).....	65
5.7.1	Comando de aquisição.....	66
5.7.2	Comando de transferência de aquisição.....	66
5.7.3	Funções secundárias do <i>firmware</i> .....	66
5.8	Considerações finais do capítulo.....	69
6.	<i>Software</i> residente na Central de Processamento.....	71
6.1	Algoritmo de rastreamento da fundamental mecânica.....	73
6.2	Algoritmo para rastrear todas as harmônicas de interesse.....	75
6.3	Procedimento de detecção de variação espectral.....	76
6.4	Procedimento de geração de histórico espectral.....	76
6.5	Corrente de Neutro.....	78
6.6	Descrição do painel frontal.....	78
6.6.1	Aba Campo Magnético.....	79
6.6.2	Aba Histórico.....	80
6.6.3	Aba Medição de Campo e Operação.....	81
6.7	Funções do <i>software</i> não disponibilizadas ao operador.....	82
6.7.1	Aquisições do vetor de tensão na bobina sensora.....	83
6.7.2	Aquisições de Neutro.....	84
6.8	Considerações finais do capítulo.....	84
7.	Resultados de funcionamento do equipamento.....	87
7.1	Eficácia do algoritmo de rastreamento da fundamental mecânica.....	89
7.2	Eficácia do algoritmo de rastreamento das frequências mecânicas de interesse.....	91
7.3	Medições em campo com o equipamento instalado.....	93
7.4	Ensaio do equipamento em bancada.....	99
7.5	Considerações finais do capítulo.....	101
8.	Conclusões e Perspectivas.....	103
	BIBLIOGRAFIA.....	106

## 1. Introdução

Grande parte da energia elétrica gerada no Brasil e no mundo provém de máquinas síncronas. Os princípios de funcionamento desta máquina estão consolidados no que se refere à sua função principal, conversão de energia mecânica em energia elétrica. Contudo, não existem ainda teorias e metodologias consolidadas, tanto no meio acadêmico quanto no industrial, que abordem com precisão a detecção de faltas incipientes ou estabelecidas nestas máquinas por meio de análises de formas de onda medidas do campo magnético externo. Além disso, também continua sendo um assunto no estado da arte o desenvolvimento de metodologias que empregam formas de onda medidas no interior (região do entreferro) destas máquinas, apesar de existir equipamentos comerciais.

Levando em consideração o fato de que geradores de grande porte possuem um alto valor agregado, tanto em si quanto na produção da energia elétrica, a detecção de uma falta incipiente em seu estágio inicial pode ajudar a evitar danos severos no ativo de uma empresa e, conseqüentemente, diminuir prejuízos para a geradora. A previsão de faltas incipientes fornece ainda um acréscimo de segurança na operação da máquina, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico. Estes são alguns dos fatores que justificam e motivam esforços para se estudar e desenvolver meios de diagnosticar se a máquina está ou não saudável.

Academicamente, há muitos trabalhos que abordam faltas em máquina elétricas, principalmente sobre a máquina de indução trifásica. Há também trabalhos [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10] em menor quantidade que abordam este assunto em Máquinas Síncronas (MS). Recentemente, há também trabalhos de pesquisa em MS voltados para aplicações de conversão eletromecânica proveniente de energia eólica [11,12]. Porém, trabalhos que aplicam a metodologia de medir o campo magnético externo para analisar a máquina são raros. Entre eles, estão [1], [2], [7] e [13].

Existem basicamente dois tipos básicos de geradores distribuídos pelos parques geradores hidráulicos e térmicos: os hidráulicos com número de polos alto, e a sua rotação nominal geralmente é baixa (menor que 200 rpm); e os térmicos que são geralmente máquinas de dois polos com velocidade nominal de 3600 rpm. Os geradores tocados a turbina a vapor também são chamados de turbogeradores [14].

No entorno da máquina síncrona existe um campo magnético disperso. Este campo magnético deveria ser contido e permanecer dentro do aço elétrico da máquina. Porém ele se dispersa, pois o aço não possui uma permeabilidade infinita. O campo que circunda a máquina é uma imagem da corrente e/ou uma composição das correntes que circulam pelos enrolamentos do estator, enrolamentos do rotor, correntes parasitas no aço ou correntes de Foucault e também do campo magnético residual presente no rotor. A dispersão de campo, que a princípio poderia ser vista como uma desvantagem, na verdade se torna uma vantagem quando se percebe que informações a respeito do funcionamento da máquina (saúde dos enrolamentos, isolamento das chapas etc.) foram carregadas para fora da máquina, não necessitando, portanto, de instalar elementos sensores na parte interna da máquina para obtê-las. Esse espectro magnético externo da máquina fornece então o que se pode dizer de “assinatura magnética”.

Apesar de essas máquinas possuírem o mesmo propósito - o de gerar energia elétrica, elas não possuem uma mesma assinatura magnética. Suas assinaturas magnéticas diferem bastante uma da outra, e isso se deve ao fato de possuírem números diferentes de polos e, portanto, velocidades síncronas diferentes, número de ranhuras diferentes, assim por diante.

Esse trabalho foi motivado e desenvolvido no âmbito do projeto de P&D da ANEEL de código PD-0403-0033/2012 e de nome “Desenvolvimento de um equipamento para detecção de falhas em geradores síncronos através do campo magnético externo”. As empresas financiadoras do projeto são a Tractebel Energia S.A. e a Itasa Energética S.A., com a Universidade Federal de Santa Catarina como instituição executora. Além disso, ele é uma continuidade do trabalho realizado em [1].

## 1.1 O gerador trifásico: história

O primeiro gerador trifásico foi construído por Friedrich August Haselwander em 1887 [Figura 1]. O equipamento gerou 2,8 kW a uma rotação de 960 rpm e um frequência de 32 Hz [15].

**Figura 1: Primeiro gerador trifásico construído (foto do museu em Munique, Alemanha) [15].**



Até 1950 houve grande evolução nos geradores síncronos, mas foi entre os anos de 1950 a 1960 que o aumento de potências geradas deu um salto. Um dos aperfeiçoamentos criados foi a refrigeração à água dos condutores de enrolamentos do estator [15].

A partir de então máquinas de vários megavoltampere foram desenvolvidas, tendo-se já ultrapassado a barreira do gigavoltampere.

## **1.2 O gerador trifásico: principio de funcionamento**

O gerador síncrono é composto pelo estator e pelo rotor. O estator aloja um enrolamento trifásico onde é induzida a tensão pelo movimento do rotor. No enrolamento do estator, a tensão induzida é da forma alternada, a qual produzirá uma corrente igualmente alternada quando o mesmo se encontrar sob carga. O rotor contém um enrolamento que é alimentado em corrente contínua e serve para criar o campo magnético de excitação da máquina.

O rotor do gerador síncrono é movido por uma máquina primária (geralmente uma turbina) e induz o campo girante de mesma velocidade rotórica no entreferro. No entanto, a frequência da força eletromotriz (ou frequência elétrica induzida em seus terminais) dependerá também do número de polos do gerador. O número de polos no estator é igual ao

número de polos do rotor. A equação que define a frequência elétrica ( $f_e$ ) da máquina em função do número de polos ( $P$ ) e da velocidade síncrona ( $n_m$ ) é apresentada na Eq. 1.1 [16].

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \text{Eq. 1.1}$$

Quando sob carga em seus terminais, a resultante do campo girante no estator se defasa em relação à resultante do campo girante imposto pelo rotor. A esse ângulo de defasagem dá-se o nome de ângulo de carga.

### 1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo desenvolver equipamentos para serem instalados para monitorar geradores síncronos em usinas de energia elétrica através do campo magnético externo, ou seja, obter informações a respeito de seu funcionamento através de sua assinatura magnética. Também, objetivou-se desenvolver o equipamento para monitorar tanto geradores hidráulicos quanto turbogeradores.

Tanto para os geradores hidráulicos quanto para os turbogeradores, buscou-se basear o desenvolvimento em um mesmo *hardware* residente nos equipamentos de monitoração. Para o *software* que integra também os equipamentos desenvolvidos, há, no entanto, a necessidade de que tenham algumas particularidades. Essas diferenças no código se devem ao fato já comentado anteriormente de que as máquinas possuem características diferentes nas assinaturas magnéticas devidas ao número de polos e à velocidade nominal.

Ao final do trabalho, apresentam-se resultados preliminares de medições feitas no primeiro equipamento desenvolvido o qual se instalou em uma usina hidroelétrica. Verificou-se o desempenho dos *softwares* no processamento dos sinais de assinatura. Também verifica-se se o conteúdo espectral na assinatura magnética são promissores na utilização como fonte de informações para diagnosticar a saúde de máquinas síncronas.

## 1.4 Metodologias utilizadas

No desenvolvimento do *hardware* dos equipamentos, utilizou-se como recurso principal um sistema de processamento comercial muito robusto. Esse sistema é comercializado pela National Instruments, com o nome de CompactRIO (CRIO) [17]. Esse sistema possui um processador físico conjugado com um processador FPGA que juntos fornecem uma solução quase completa para aquisição e processamento de sinais tanto analógicos quanto digitais.

O equipamento utilizado foi o CompactRIO NI-9082 RT, com 2 módulos de I/O digitais NI-9401 e 1 módulo de I/O analógico NI-9220.

Desenvolveu-se também uma eletrônica destinada ao condicionamento dos sinais analógicos de campo e ainda eletrônica digital com conversão A/D para transmissão dos sinais via fibra óptica. A necessidade de utilização da fibra óptica se justifica devido ao fato de que os elementos sensores utilizados na medição de campo magnético da máquina, chamados neste trabalho de “Unidades de Monitoramento”, são instalados em distâncias que podem chegar a 40 metros do sistema de processamento CompactRIO. A utilização de cabos elétricos para transmitir sinais analógicos de pequena amplitude (100uV ~ 10mV) não é aconselhável nestas distâncias, principalmente quando se deseja manter a integridade do sinal. Já a transmissão digitalizada dos sinais via cabos elétricos é mais confiável, no entanto, como os cabos possuiriam comprimentos maiores de 10 metros julgou-se aconselhável manter a imunidade a interferências através do uso da fibra óptica. O sistema CompactRIO por sua vez, foi instalado em um painel elétrico em conjunto com algumas placas que se comunicam com as Unidades de Monitoramento. A esse painel nomeou-se de “Central de Processamento”.

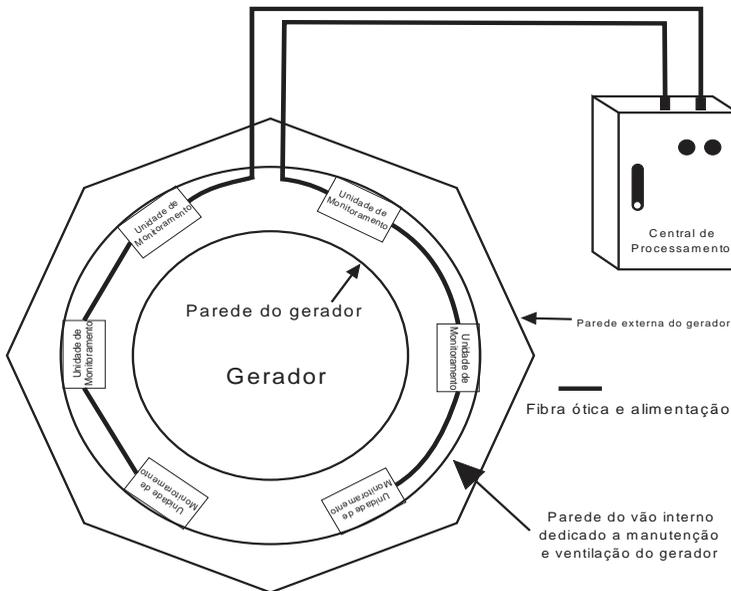
Para o desenvolvimento do software utilizou-se da ferramenta de programação gráfica LabVIEW [18] também da National Instruments. Esse ambiente foi utilizado na programação do software principal instalado na controladora do CompactRIO e também no *software* do processador FPGA. O programa principal é executado na controladora do sistema CompactRIO, um processador i7 de 4 núcleos e com 1,86 GHz de velocidade de *clock*. O programa executado no processador FPGA é responsável pela comunicação com os módulos de I/O, pelo

protocolo de comunicação através da fibra óptica, pelo tratamento dos sinais medidos e apresentação dos resultados.

Para as unidades de monitoramento, utilizou-se um microcontrolador PIC18F4525 [19]. Sua programação foi desenvolvida em linguagem C. O microcontrolador é responsável por todo o processamento da unidade e interpreta os comandos da Central de Processamento que chegam pela fibra óptica.

A Figura 2 apresenta um esquemático funcional das partes que compõem o equipamento desenvolvido e uma possível instalação em uma unidade geradora de uma usina hidroelétrica. As unidades de monitoramento são interligadas em série e por fibras ópticas. A utilização de um sistema série de unidades proporciona a utilização de um único par de fibras ópticas passando pelo eletroduto desde a primeira unidade até a última do ramo. Isso facilita a instalação do sistema no gerador e economiza cabos de fibra óptica.

**Figura 2: Ilustração do sistema desenvolvido com uma possível configuração de instalação.**



Apresentou-se aqui um sumário da metodologia empregada na implementação do sistema de monitoramento de geradores a fim de facilitar o entendimento do leitor no texto da dissertação. Não é possível explanar os conteúdos em uma sequência única de informações e conhecimentos. Pois, as partes do desenvolvimento, e de implementações, são intrincadas, às vezes necessitando de conhecimentos que só poderão ser tratados posteriormente ao ponto em questão.

## 1.5 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 é apresentado todo o sistema de medição desenvolvido, começando pelos elementos sensores. Em seguida são vistos os circuitos desenvolvidos para o condicionamento analógico dos sinais, o circuito seletor de ganho e o conversor A/D.

No capítulo 3 é abordada a central de processamento, a qual é parte do equipamento responsável por ser o centro de comando e realizar as análises dos dados. Esta central contém o sistema CompactRIO.

No capítulo 4 são apresentadas e discutidas as unidades de monitoramento. Nelas acontecem as aquisições de sinais de campo magnético externo da máquina. São discutidos nesse capítulo os circuitos e os componentes que a integram.

O *software* geral integrado na central de processamento, discutida no capítulo 3, é tratado no capítulo 5. Neste capítulo, abordam-se os principais códigos que compõe o programa principal da central e também quais tipos de arquivos e quais os dados que são armazenados, como também a maneira de como eles são salvos.

No capítulo 6 expõem-se os resultados obtidos, as medições e algumas conclusões sobre o funcionamento do programa e eventos capturados.

Por fim, no capítulo 7, as conclusões sobre o trabalho são discutidas. Sugestões de continuidade do trabalho são apresentadas.



## 2. Contextualização do trabalho

Neste trabalho buscou-se desenvolver um equipamento, ou mais precisamente, uma ferramenta que pudesse auxiliar nos estudos da análise de campos magnéticos externos de geradores síncronos de grande potência (usinas hidroelétricas e usinas térmicas). O intuito é prover no futuro as primeiras aplicações em campo na previsão e detecção de faltas incipientes. Este trabalho é a conclusão de uma ferramenta resultado dos estudos efetuados na tese de doutorado [1].

Comercialmente, verifica-se que ainda existem poucos sistemas aplicados em campo para análise de campos magnéticos em geradores síncronos. Um produto comercial voltado a este fim é o equipamento da empresa canadense Iris Power [20]. A seguir, apresentam-se alguns trabalhos sobre este assunto.

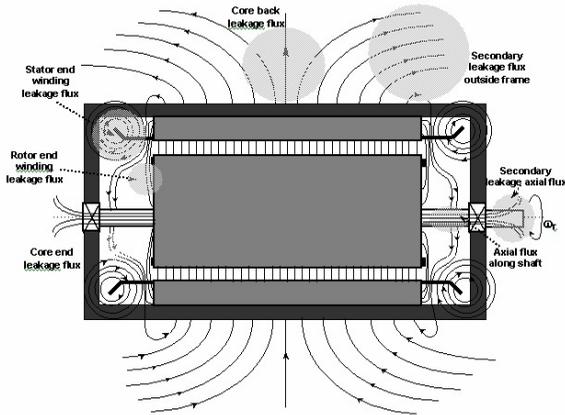
### 2.1 Estudos realizados para detecção de faltas utilizando sensores de entreferro

Em 1970 iniciaram-se alguns estudos que buscavam apresentar ferramentas para os problemas de sobreaquecimentos causados por curto-circuitos. Estes estudos buscavam detectar curtos entre espiras através da avaliação dos campos magnéticos no entreferro e no entorno do núcleo e dos enrolamentos do estator. Estes trabalhos foram realizados pelos engenheiros da empresa NEI Parsons (hoje Siemens), Dr. A. Anderson [21] e Dr. J. Wood [22], e também pela empresa americana General Electric através do engenheiro D. R. Albright [23]. Trabalhos recentes que ainda utilizam o fluxo de entreferro são [5], [6] e [24].

### 2.2 Campo magnético externo a geradores síncronos

A detecção de faltas incipientes em máquinas elétricas através do campo magnético externo vem comprovar ser viável a ser aplicada em campo. Trabalhos como [25] mostram que os campos magnéticos conseguem se dispersar externamente da carcaça de máquinas, com pontos de maior e menor concentração de fluxo. A Figura 3 mostra em detalhes estes pontos para um motor de indução trifásico.

**Figura 3: Ilustração dos pontos de concentração de fluxo magnético em uma máquina elétrica [25].**



Para geradores síncronos, no entanto, os únicos trabalhos conhecidos que aplicam o campo magnético externo na análise são [1], [2], [7] e [13]. Nestes trabalhos ficou comprovado que variações causadas por curtos circuitos ou excentricidades nos enrolamentos de campo da máquina alteravam de forma visível sua assinatura magnética (espectro de frequência dos sinais de campo magnético).

Para faltas no estator, verifica-se a inexistência de trabalhos conhecidos. Resultados preliminares foram obtidos em [1]. Através destes resultados, mostra-se o maior grau de dificuldade em detectar estas faltas em relação às faltas rotóricas. Entretanto, variações foram detectadas indicando que é possível de serem efetuadas e que novas abordagens devem ser empregadas para melhorar a ferramenta, tais como a monitoração de componentes mais altas do espectro e a utilização de sensores bem distribuídos por todo o pacote estatórico.

### 2.3 Sistemas VibroSystM

Dentre os produtos comerciais mais conhecidos do mercado para aplicação em monitoração de geradores síncronos estão os sistemas de monitoração VibroSystM [26]. Esta empresa proporciona uma ampla

gama de tipos de monitoração da máquina centrando seus sinais de aquisição provenientes de diversos tipos de sensores em um único armário (Figura 4). Este armário contém quantas unidades de processamento (Figura 5) forem necessárias, e cada unidade de processamento é multicanal e multiparâmetros de análise.

**Figura 4: Armário ZOOM [26].**



**Figura 5: Unidade de processamento [26].**



Um dos parâmetros de análise dos sistemas VibroSystem é o de vibração mecânica, podendo esta ser obtida em diversos pontos da estrutura do gerador, onde cada ponto possui um tipo específico de sensor, conforme as Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

**Figura 6: Vibração nas cabeças de bobina [26].**



**Figura 7: Vibração do núcleo do estator, deslocamento axial & radial do mancal de guia, vibração da caixa espiral, vibração no tubo de sucção, vibração no bulbo [26].**



**Figura 8: Deslocamento radial do eixo, deslocamento axial & deslocamento da carcaça do estator.**



**Figura 9: Vibração das barras do estator [26].**



O armário contendo as várias unidades de processamento é chamado de armário “ZOOM” e possui uma interface acoplada que comunica com um servidor de banco de dados. É possível em uma estação remota acessar através do software “ZOOM” todos os dados operacionais da máquina assim como sua condição de operação.

A empresa VibroSystM fornece uma enorme gama parâmetros de monitoração e diagnósticos. No entanto, não possui monitoração através campo magnético externo. Atualmente, a análise de resultados e os diagnósticos são complexos e realizados por especialistas da própria empresa VibroSystM.

## 2.4 Equipamento Flux TracII da empresa Iris Power

Neste equipamento são utilizadas bobinas-sonda na região de entreferro do gerador para monitorar o valor do fluxo magnético produzido por cada um dos polos. O aparelho é destinado para detectar falhas no rotor, ou seja, nos polos do rotor. O equipamento desenvolvido pela empresa Iris Power é composto resumidamente pelos elementos sensores de indução aplicados no entreferro – TFProbe (Figura 10), por chaves determinadoras de fase (Keyphasor) para determinar os polos do rotor e por uma pequena central (FluxTracII - Figura 11 - [27]) que trata os sinais e faz a análise, permitindo também a disponibilização destes dados através de um sistema remoto (sistema SCADA). Um diagrama em blocos do sistema é apresentado na Figura 12.

Figura 10: Sensor TFProbe [27].

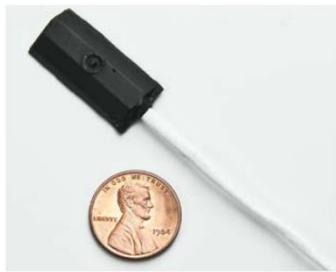
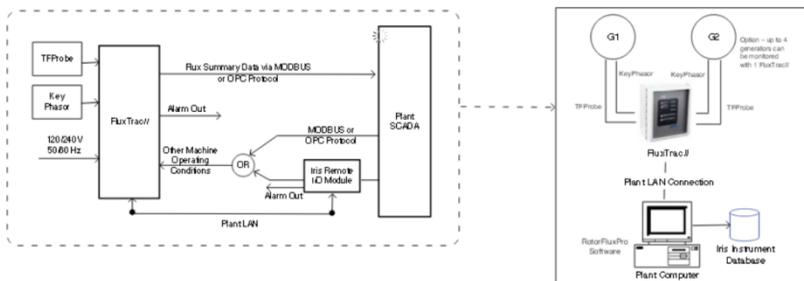


Figura 11: Central de processamento [27].

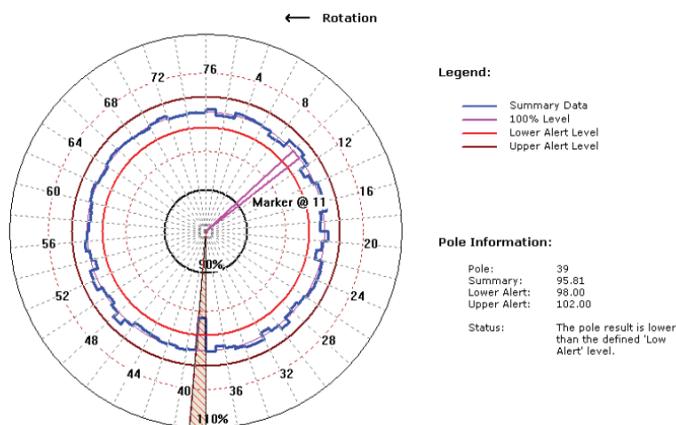


Figura 12: Diagrama em blocos do sistema [27].



O funcionamento do equipamento se resume à monitoração de cada polo em tempo real. Havendo alteração de fluxo magnético significativo acima ou abaixo de certo limiar, aciona-se alarmes com indicação do polo defeituoso. A Figura 13 resume como este procedimento é realizado. No exemplo mostrado na Figura 13, verifica-se que para ser considerado normal, o fluxo de entreferro deve estar entre 98% e 102% do fluxo nominal da máquina para um dado ponto de operação. O polo 39 está com 95,81% do fluxo de entreferro considerado normal, disparando então o alerta de fluxo baixo.

**Figura 13: Diagrama radial de amplitudes utilizado pelo sistema [27].**



## 2.5 Considerações finais do capítulo

Tratou-se resumidamente aqui de trabalhos relacionados ao assunto em questão, indicando os trabalhos mais relevantes. Citou-se também o sistema de monitoração VibroSystM, de reconhecimento internacional, como também o equipamento FluxTracII da empresa Iris Power, o qual faz uso de monitoração do fluxo de entreferro. No próximo capítulo se abordará o sistema de medição, condicionamento e digitalização dos sinais de campo magnético desenvolvido do equipamento desenvolvido neste trabalho.



### 3. Sistema de medição, condicionamento e conversão analógico/digital dos sinais de campo magnético.

O sistema de medição, condicionamento e digitalização dos sinais de campo magnético é composto pelos seguintes componentes funcionais: elementos sensores, amplificador e filtro, chaves seletoras de ganho, conversor A/D. A seguir, estes elementos são discutidos.

#### 3.1 Elementos sensores

Emprega-se no equipamento desenvolvido dois tipos de sensores nas unidades de monitoramento: sensor por indução e sensor magnetoresistivo.

##### 3.1.1 Sensor de indução

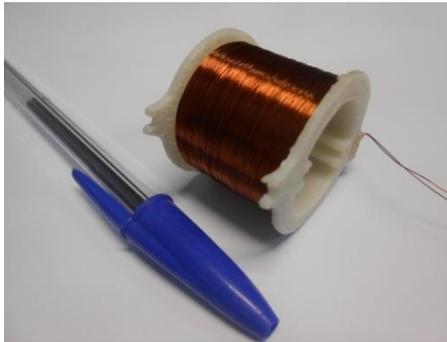
O sensor de campo magnético por indução é o principal elemento sensor utilizado nos equipamentos desenvolvidos. Trata-se de um transdutor capaz de converter campo magnético variante em um sinal elétrico, o qual é a imagem da derivada temporal do campo magnético por um fator de escala. Este sensor é basicamente uma bobina com núcleo de ar (Figura 14) e pode operar desde a faixa de poucos hertz até centenas de megahertz. A Eq. 2.1 relaciona a tensão induzida  $v(t)_{bobina}$  nos terminais de uma bobina sonda com a derivada temporal do campo  $H$ , sua dedução é apresentada em [28,29,30]. Ela provém da lei de indução de Faraday e, por se tratar de um sensor por indução, não é capaz de medir campos contínuos DC. A Figura 15 apresenta uma foto da bobina sonda construída para o equipamento.

**Figura 14: Bobina sonda de núcleo de ar [31].**



$$v(t)_{bobina} = -\mu_0 NS \frac{dH}{dt} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Figura 15: Bobina sonda das unidades de monitoramento.



Como se verifica na Eq. 2.1, o sensor de indução fornece um sinal que é a derivada temporal do campo magnético vezes o fator de escala ( $-\mu_0 NS$ ). Para os sensores desenvolvidos o fator resultou em  $4,57 \times 10^{-7}$  Hm (Henry metro). Nesta equação,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar,  $N$  o número de espiras e  $S$  a secção transversal do sensor. Sensores com núcleo de ar são fáceis de modelar e sua resposta é linear com o aumento da indução magnética. Por esta razão, optou-se por não colocar núcleo de aço ou outro material ferromagnético.

Para prover a informação do campo contínuo para possíveis estudos futuros, instalou-se também um sensor de campo DC, conhecido como sensor de campo Magneto-resistivo Anisotrópico, o qual será descrito no item seguinte.

### 3.1.2 Sensor AMR

O sensor *AMR* (*Anisotropic Magneto-resistive*) ou sensor Magneto-resistivo Anisotrópico é um elemento sensor para medir campos magnéticos muito baixos (faixa de 0,5 A/m até 600 A/m). Ele opera desde medições de campo DC até a faixa de alguns megahertz, dependendo do modelo [32]. No equipamento desenvolvido optou-se pelo dispositivo HMC5883L [33] da Honeywell mostrado na Figura 16. Este componente é capaz de se comunicar diretamente em um protocolo de comunicação digital não precisando, portanto, da conversão A/D. Este sensor foi inserido no equipamento unicamente para medições de

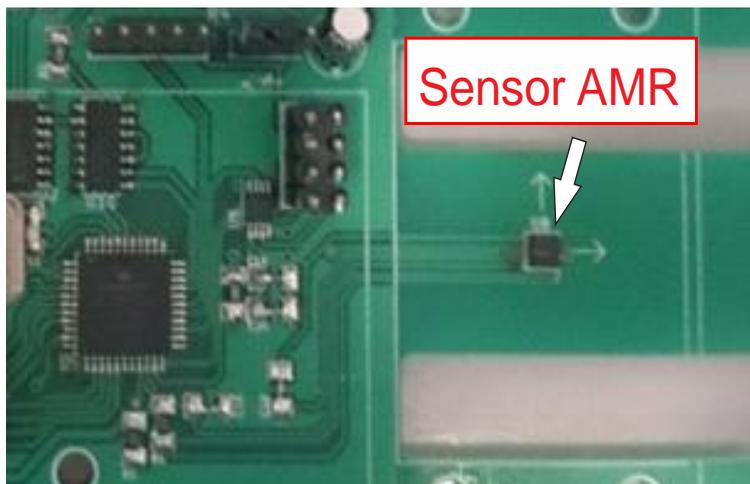
campo DC. Suas medições deverão servir de base para estudos dos campos contínuos.

A Figura 17 apresenta uma foto da placa mãe implementada neste trabalho para a unidade de monitoramento, mostrando em detalhe o sensor AMR com sua localização na placa.

**Figura 16: Sensor HMC5883L.**



**Figura 17: Sensor AMR na placa de monitoramento - detalhe.**



O sensor AMR empregado possui uma taxa de amostragem máxima de 160 amostras por segundo, com uma faixa de medição que vai desde alguns miliampères por metro até 636 A/m.

### 3.2 Amplificador e filtro

Inicialmente, apresenta-se uma visão resumida da implementação das funções de amplificação e filtragem empregadas no equipamento desenvolvido. O circuito de amplificação e filtragem é responsável em condicionar o sinal analógico proveniente da bobina sonda, acrescentando um ganho adequado ao sinal, filtrando componentes de alta frequência não desejados e eliminando ruído de modo comum. A foto apresentada na Figura 18 mostra a placa com os componentes eletrônicos implementados. As funções da placa são executadas principalmente pelos circuitos integrados numerados na Figura 18. A seguir são descritas as funções de cada componente principal:

a) Os componentes U1 e U2 (ADG1611 [34]) são chaves seletoras/controladoras de ganho para adequar o nível de tensão proveniente do sensor ao restante do circuito. Cada CI possui internamente 4 interruptores. Isto é realizado pela comutação de resistores em uma rede através da combinação paralela desses resistores. Como resultado, a configuração da rede de resistores fornece um valor de ganho no amplificador de instrumentação (U4) aproveitando sua faixa de operação em termos de amplitude de tensão. Isto será importante para a etapa de conversão A/D;

b) O circuito integrado U3 é um amplificador totalmente diferencial, o qual pré-amplifica o sinal de entrada, isto é, do sensor de indução, com ganho fixo de 3,3 V/V;

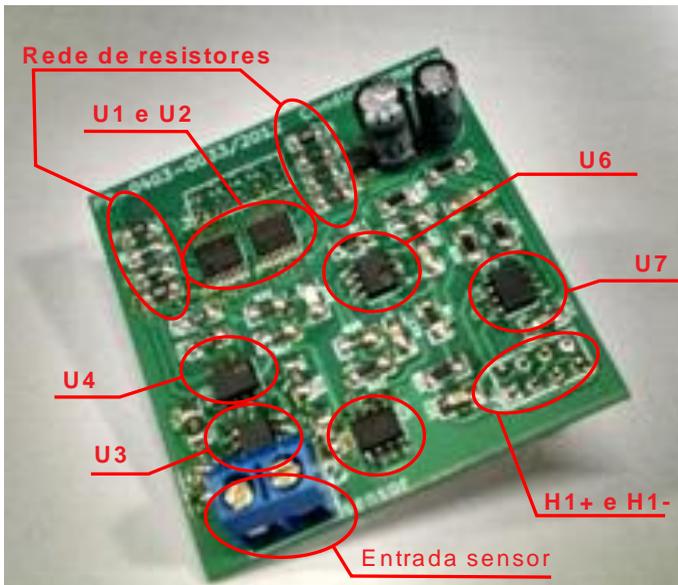
c) O componente U4 é o principal elemento do circuito de condicionamento analógico. Escolheu-se o amplificador de instrumentação INA118 [35] por ter uma alta rejeição ao ruído de modo comum (CMRR). Ele é responsável por receber o sinal totalmente diferencial do elemento U3 e amplificá-lo com o ganho adequado realizado pela combinação selecionada de resistores por U1 e U2;

d) O sinal de saída *single-ended* do amplificador de instrumentação U4 precisa ser convertido para um sinal totalmente diferencial. Emprega-se o amplificador operacional OP1177 [36], nomeado U5 na placa conforme apresentado na Figura 18;

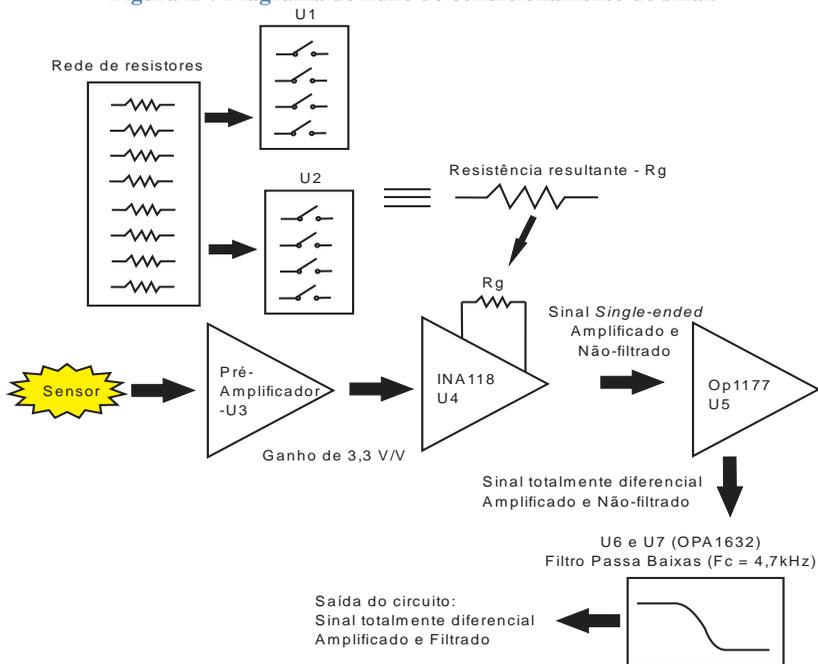
e) Como os sinais carregam ruídos espúrios, bem como posteriormente o sinal analógico será convertido em digital, sendo necessário um filtro antirecobrimento. Emprega-se um único filtro de 4ª ordem passa baixa, com frequência de corte centrada em 4,7 kHz, composto pelos circuitos integrados OPA1632 [37] (U6 e U7) e com seus componentes passivos associados. O circuito do filtro também é utilizado para adicionar o *offset* de 2,5 V necessário para referenciar o "0" (zero) V do conversor A/D que compõe a placa da unidade de monitoramento, que será tratado no item 2.4. O sinal de saída totalmente diferencial da placa, acrescido do nível de 2,5V é disponibilizado nos bornes H1- e H1+. A Figura 19 mostra o fluxo do sinal condicionado por esta placa. A Eq. 2.2 [38] fornece a equação de um filtro de 4ª ordem ativo no domínio laplaciano, onde  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$  e  $R_2$  são elementos do circuito.

$$H(s) = \frac{1}{(1 + C_2(R_1 + R_2)s + C_1C_2R_1R_2s^2)^2} \quad \text{Eq. 2.2}$$

**Figura 18: Placa de condicionamento analógico.**



**Figura 19: Diagrama de fluxo do condicionamento do sinal.**



Na sequência, detalham-se os circuitos apresentados brevemente acima.

### 3.3 Chaves seletoras de ganho (U1 e U2)

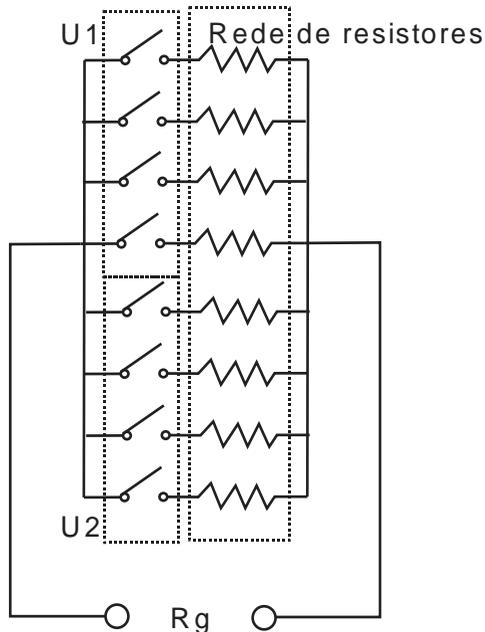
Este circuito de seleção de ganho, como mencionado, é responsável por atuar sobre o resistor de ganho do amplificador de instrumentação (INA118). O ganho do amplificador de instrumentação é definido pela Eq. 2.3 [35].

$$G = 1 + \frac{50000}{R_g} \quad \text{Eq. 2.3}$$

O valor da resistência  $R_g$  é imposto pela combinação paralela de uma rede de 8 resistores que são comutados pelas 8 chaves internas dos CI's U1 e U2. A Figura 20 apresenta o esquemático de como a

combinação é realizada para fornecer o valor de  $R_g$ . As chaves ligam e desligam os resistores fornecendo até 256 combinações de associações em paralelo. Para otimizar os ganhos foi desenvolvido um programa para linearizar os ganhos e obter uma melhor linearização possível com a combinação de 8 resistores. Com a rede implementada, foram possíveis obter até 137 valores de resistências  $R_g$  diferentes e, conseqüentemente, 137 valores de ganhos diferentes. As chaves analógicas são acionadas diretamente por um microcontrolador presente na unidade de monitoramento (o qual será abordado no capítulo 4 deste trabalho).

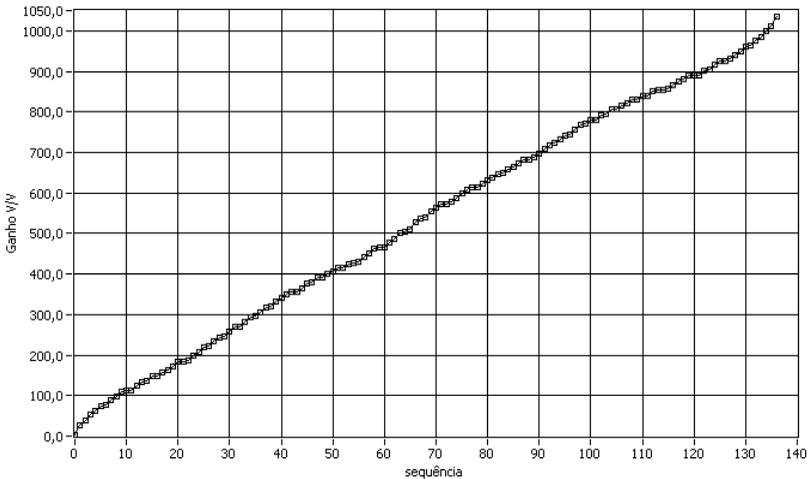
**Figura 20: Esquemático simplificado das chaves com a rede de resistores.**



### 3.3.1 Determinação dos valores de resistores da rede

Os valores dos 8 resistores da rede foram obtidos através de uma análise para otimizar os valores dos ganhos dados em função de  $R_g$  e levando em conta os valores comerciais de resistores. Buscou-se obter incrementos uniformes nos valores dos ganhos, objetivando-se obter um comportamento linear na amplificação dos sinais. Os resistores obtidos para a rede foram 330, 680, 1500, 3300, 4700, 4700, 4700 e 6800 ohms, os quais resultaram em um ganho mínimo no circuito de 3,3 V/V e máximo de 1035 V/V. O gráfico da Figura 21 mostra a curva de ganho obtida.

**Figura 21: Curva de ganhos obtida com a rede de resistores implementada.**



### 3.4 Conversor A/D

A placa de condicionamento analógico em conjunto com o sensor de indução converte o sinal do campo magnético em um sinal elétrico que é a imagem da derivada temporal do campo magnético. Conforme já realizado em [1,39], esse sinal elétrico possui qualidade e amplitude suficiente para ser digitalizado. Esta conversão é realizada na placa

principal da unidade de monitoramento, que será apresentada posteriormente. Para executar esta tarefa, foi escolhido o conversor A/D ADS8317 [40] da Texas Instruments. Ele possui resolução de 16 *bits*, é totalmente diferencial e possui uma taxa de amostragem máxima de até 250kSps (*kilo samples per second*). No equipamento desenvolvido, utilizou-se uma taxa de amostragem menor, de 10 kSps. Sua comunicação com o microcontrolador da unidade de monitoramento é feita diretamente através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*).

Por se tratar de um componente com interface digital, ele não é apto para operar em tensões simétricas, e por isso necessita que a referência do sinal tenha um *offset*. Como apresentado anteriormente, no circuito de filtragem é adicionado o nível contínuo de tensão de 2,5 V (metade da tensão de operação do microcontrolador). Os valores negativos do sinal de tensão se situam no intervalo de 0 V a 2,5 V, e tensões positivas no intervalo de 2,5 V a 5 V.

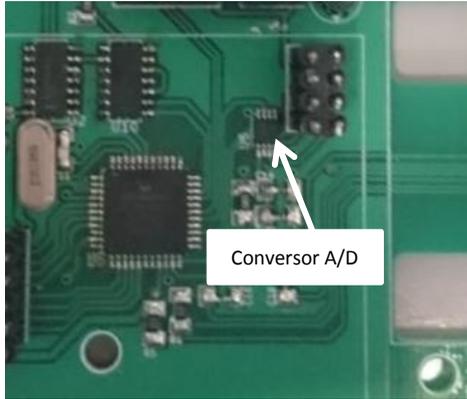
A

Figura 22 apresenta uma foto do componente e na Figura 23 é apresentada uma foto de uma região da placa de monitoramento e a localização do componente ADS8317.

**Figura 22: Foto do componente ADS8317.**



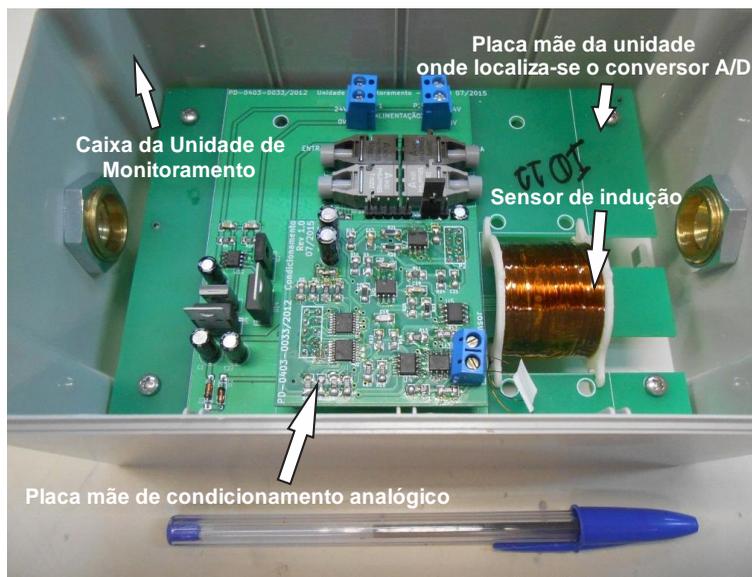
**Figura 23: Conversor A/D na placa de monitoramento.**



### **3.5 Considerações finais do capítulo**

Neste capítulo, apresentou-se o sistema levando em conta o fluxo do sinal de informação do sensor até a saída analógica totalmente diferencial e o conversor A/D. Os circuitos correspondentes às várias funções discutidas são implementados em duas placas eletrônicas, alojadas nas unidades de monitoramento do sistema (Figura 24). O próximo capítulo trata da central de processamento.

Figura 24: Caixa da unidade de monitoramento (vista interna).





#### 4. Central de processamento do equipamento desenvolvido

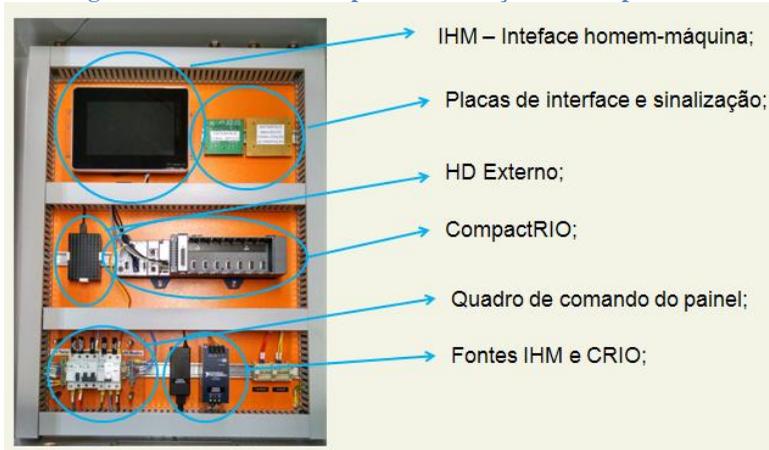
Este capítulo aborda a central de processamento do equipamento (Figura 25), onde se encontra alojado o sistema CompactRIO da empresa National Instruments. Nela são i) gerenciados todos os processos de aquisição, ii) obtidas as assinaturas magnéticas, as quais são espectros de frequência provenientes de decomposições de sinais através da transformada rápida de Fourier - FFT, iii) realizadas análises do comportamento de componentes de frequência e iv) armazenamento/salvamento de dados/arquivos.

**Figura 25: Painel elétrico do sistema da central de processamento.**



A central de processamento desenvolvida é um painel elétrico onde estão contidos, além do sistema CompactRIO, outros equipamentos conforme ilustrado na Figura 26 e descritos a seguir.

**Figura 26: Vista interna do painel e descrição dos componentes.**



#### 4.1 HD externo

O equipamento necessita armazenar dados. O HD externo é utilizado para o arquivamento das aquisições, histórico e demais dados salvos. Possui dois TB de espaço o que permite uma autonomia de salvamento de alguns meses. Por se tratar de um dispositivo *Plug and Play*, torna-se fácil à troca de HD por um vazio quando o mesmo se encontrar cheio.

#### 4.2 CompactRIO

Componente principal do painel, possui uma controladora (processador i7 de 1,86 GHz), um processador FPGA, um módulo de I/O NI-9220 (analógico) e dois módulos NI-9401 (digitais) compoendo seu *hardware*. O CompactRIO possui um sistema operacional Windows 7 professional 32 *bits*, permitindo ao operador trabalhar com um sistema já difundido e de fácil uso.

### 4.3 Interface homem-máquina (IHM)

No procedimento de monitoração de geradores, é necessário que o usuário possa acessar resultados, bem como configurar o sistema para adequá-lo ao gerador sob averiguação. Assim, verificou-se a necessidade de possibilitar o acesso do usuário ao sistema. A interface homem-máquina (IHM) do equipamento é um monitor que possibilita ao operador configurar, visualizar e ajustar o equipamento. O monitor é controlado através do CompactRIO onde se executa um sistema operacional Windows 7 Professional 32 *bits*. Desta maneira, através da IHM sensível ao toque, de resolução 1280x800 pixels, é possível operar todo o equipamento, não necessitando de teclado e *mouse* adicionais.

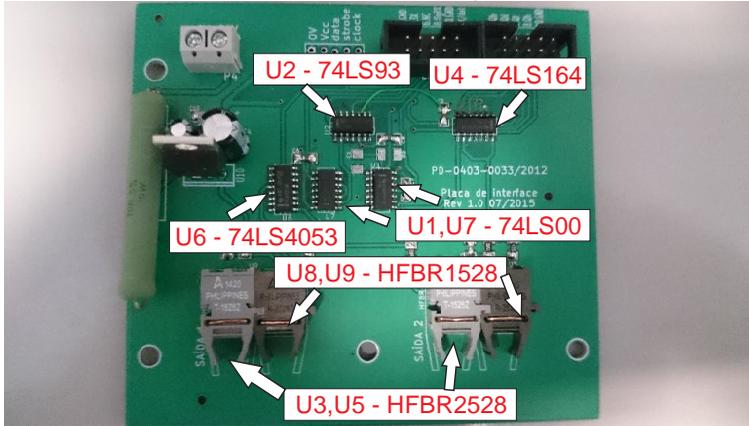
### 4.4 Comunicação entre a central de processamento e as unidades de monitoramento

Para a realização da comunicação entre a central de processamento e as unidades de monitoramento, desenvolveu-se e implementou-se um protocolo de comunicação que opera na transmissão de dados digitais por fibra ótica. Para cada unidade de monitoramento, implementou-se circuitos eletrônicos de transmissão (TXu) e recepção (RXu) de sinais. Para a central de processamento, desenvolveu-se uma placa eletrônica que também executa as funções de recepção (RXc) e transmissão (TXc) de dados.

#### 4.4.1 Placa de interface

A placa de interface de comunicação residente na central de processamento possui a função de comunicação através da fibra ótica de dois canais (canal 1 e canal 2) com as unidades de monitoramento. Ela converte os *bits* seriais que chegam pela fibra ótica das unidades de monitoramento em *bits* paralelos para serem carregados nos módulos de I/O digitais do CRIO, que para operar com rapidez necessita utilizar *bytes* em vez de *bits* (um *byte* é formado por 8 *bits*). Na Figura 27 é apresentada uma foto da placa com indicação dos circuitos integrados.

Figura 27: Foto da placa de interface e descrição dos circuitos integrados.



A função de cada circuito integrado presente nesta placa é detalhada a seguir:

a) o componente U1 contém portas *NAND* (74LS00) usadas para inverter sinais para pinos de *clock* e *data* nos circuitos integrados U2 (74LS93) e U4 (74LS164) explicados a seguir;

b) O contador binário U2 (74LS93) é usado para contar o número de pulsos que chegam pela fibra óptica. Isto é necessário para conversão *bit/byte*: como dito, oito pulsos equivalem a oito *bits*, que por sua vez equivalem a um *byte*;

c) Os receptores de fibra óptica empregam o circuito integrado HFBR-2528, sendo U3 e U5 os elementos relativos aos canais 1 e 2 respectivamente;

d) O circuito integrado U4 (74LS164) é um *Shift Register* - conversor de oito *bits* seriais em um *byte* - conversor serial paralelo;

e) O elemento U6 (74LS4053) é um comutador que seleciona qual canal de fibra óptica será utilizado (1 ou 2);

f) Alguns destes circuitos integrados têm a entrada ou a saída com lógica invertida. Assim, o circuito integrado U7 (74LS00) possui portas *NAND* que invertem os sinais quando necessários.

g) Os transmissores de fibra óptica são os elementos U8 e U9 (HFBR-1528), respectivamente do canal 1 e do canal 2.

h) o circuito integrado U11 (74LS93) é um contador binário para medir e temporizar cada pulso transmitido na fibra óptica, onde o

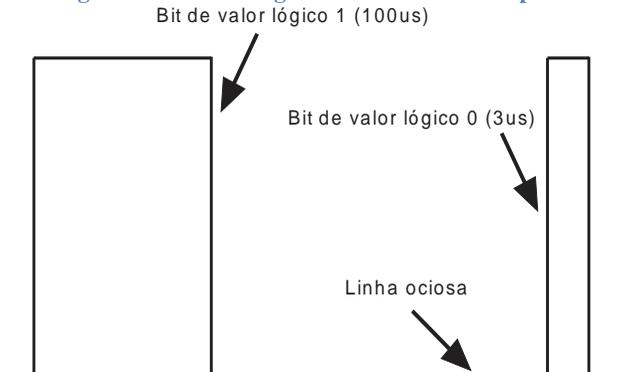
componente U12 (74LS00), que são portas *NAND*, compõe um circuito oscilador a 28 MHz que serve de base de tempo (*clock*) para o contador binário U11. Posteriormente, este bloco será novamente explicado em função do protocolo de comunicação empregado.

#### 4.4.2 Protocolo de comunicação serial desenvolvido

Para efetuar a comunicação via fibra óptica, foi necessário desenvolver um protocolo de comunicação. Em cada canal de fibra óptica existem duas linhas que formam o par de fibras ópticas, um utilizado para transmitir e outro para receber, sob o ponto de vista da central de processamento. Isto é, há fluxo de dados unidirecional da central para as unidades de monitoramento (TXc-RXu) e fluxo de dados das unidades de monitoramento para a central (RXc-TXu). A linha de comunicação RXc-TXu possui alta taxa de transmissão, pois necessita transmitir as aquisições de campo efetuadas nas unidades de monitoramento para a central de processamento. Já a linha TXc-RXu possui taxa de poucos *bytes* por segundo, pois necessita apenas transmitir comandos para as unidades.

A comunicação de ambas as linhas é feita de forma serial e assíncrona. Foi definida a maneira assíncrona para evitar a necessidade de base de tempo fixa e de ter, conseqüentemente, um maior número de pares de fibra óptica. Na maneira assíncrona, diminui-se a complexidade dos circuitos eletrônicos e facilita a instalação do sistema de monitoramento. O protocolo de comunicação desenvolvido possui três estados possíveis: i) linha em nível baixo está ociosa, sem transmitir *bits*; ii) linha em nível alto possui informação, sendo a largura de pulso estreito equivalente à informação lógica "0" (*bit=0*); iii) linha em nível alto possui informação, sendo a largura de pulso largo equivalente à informação lógica "1" (*bit=1*). A Figura 28 exemplifica as definições do protocolo empregado, conforme descrito acima.

**Figura 28: Estados lógicos da linha de fibra óptica.**



O circuito de transmissão que executa o protocolo de transmissão das linhas do tipo TXc-RXu (circuito residente na central de processamento) é gerenciado pelo CompactRIO (que possui um FPGA e uma controladora), onde o processamento de transmissão é efetuado pelo FPGA. Isto é, a modulação da largura dos pulsos é processada via software residente no CRIO. Definiu-se que o *bit* com valor lógico "1" é representado por um pulso de largura de 100us, e um *bit* de valor "0" com um pulso de largura de 3us. Os componentes que integram o transmissor são U7 (74LS00), U8 e U9 (HFBR-1528), nominados na Figura 27. A taxa de transmissão deste tipo de linha é limitada a poucos kilobytes por segundo.

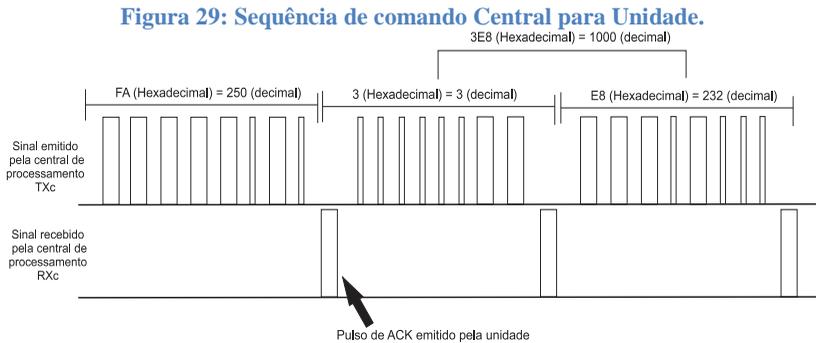
O funcionamento deste tipo de linha se resume no seguinte procedimento para cada *byte* de informação da central de processamento para a unidade de monitoramento: a central de processamento envia um *byte* de comando para a unidade de monitoramento e espera desta unidade um pulso de ACK (*Acknowledgement*), isto é, de confirmação de recebimento de *byte*.

Porém, cada tarefa de comando da central de processamento possui três *bytes* de comando. Assim, após todo o envio de uma tarefa completa, a central de processamento recebeu 3 pulsos de ACK. Existem apenas dois comandos para as unidades de monitoramento: de aquisição e de ordem para a unidade de monitoramento transmitir a aquisição realizada.

Todas as unidades adquirem o sinal simultaneamente quando o comando de aquisição é executado. No comando de aquisição, o

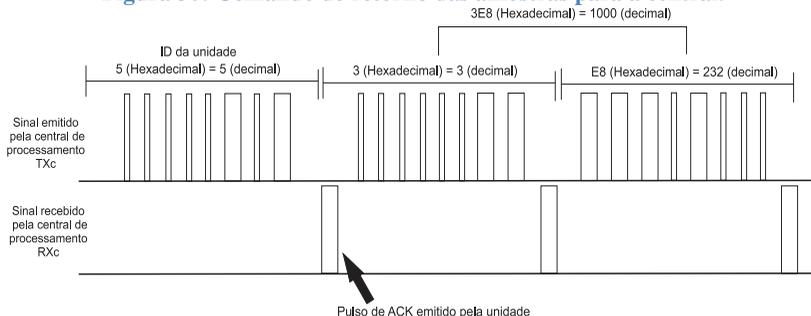
primeiro *byte* corresponde ao valor 250 (valor que as unidades entendem como ordem para efetuar a amostragem do sinal e armazenar na memória da respectiva unidade), e o segundo e terceiro *byte* fornecem o número de amostras de uma aquisição.

A Figura 29 apresenta um exemplo de comunicação da linha TXc-RXu entre a central de processamento e uma unidade de monitoramento para a efetuação de uma aquisição com um número de amostras de 1000.



O comando para que as unidades de monitoramento retornem as amostras armazenadas é composto pelo primeiro *byte*, que especifica a unidade de monitoramento através de seu ID (Identificador Digital), e os outros dois *bytes*, que correspondem ao número de amostras (tamanho do vetor do sinal de interesse). Assim, embora as unidades de monitoramento façam a amostragem do sinal simultaneamente, o envio das amostras de cada unidade é realizado em sequência definida pela configuração do programa residente na CRIO. A Figura 30 mostra um exemplo da comunicação para este comando com a requisição de 1000 amostras.

**Figura 30: Comando de retorno das amostras para a central.**



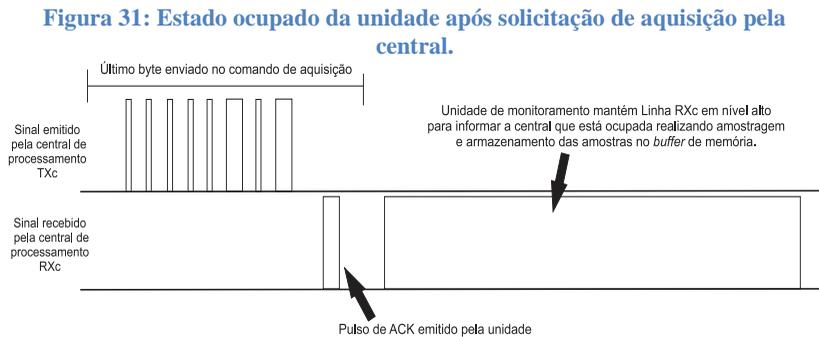
O máximo número de amostras possíveis de cada unidade é de 65535. Este valor é limitado pelo tamanho máximo do *buffer* de memória RAM na unidade, tendo como tamanho de uma amostra de 16 *bits*. Assim, o intervalo de tempo máximo de cada amostragem é de 6,5535 segundos para uma frequência de amostragem de 10 kSps (10 kSps tem um período de 0,0001 s. Fazendo a multiplicação de 0,0001s pelo número de amostras 65535 resulta no tempo de 6,5535 s).

O outro tipo de linha denominado RXc-TXu, a qual é responsável pela transmissão das amostras da unidade de monitoramento à central de processamento, possui um hardware específico para decodificar os *bits* seriais com processamento rápido (para um tamanho de amostra de cerca de 62500 - correspondente a 125 mil *bytes* - o tempo de transmissão é de cerca de 1 segundo – 125 kBytes/s). Esse hardware foi necessário devido à necessidade de taxas mais altas de transmissão para as aquisições efetuadas em diversas unidades de monitoramento. Com esta solução, não há processamento via *software* dos *bits* seriais que chegam da fibra óptica. O circuito dedicado para decodificar os *bits* entrega no módulo de I/O do CompactRIO um *byte* pronto ( *bits* de forma paralela). Assim, deixa-se de efetuar processamento de *bits* no FPGA aliviando o processamento. O circuito decodificador possui apenas circuitos integrados TTL.

O protocolo para este tipo de linha possui os *bits* também modulados em largura de pulso. No entanto, o *bit* de valor lógico "1" corresponde a uma largura de 500 ns e o *bit* de valor "0" de 200 ns. O restante do protocolo é semelhante ao do tipo da linha explicada anteriormente: a cada *byte* enviado pela unidade de monitoramento, essa

espera um pulso de ACK (provindo agora da central de processamento) de confirmação de recebimento de *byte*. O ACK de confirmação também inibe envio de *bytes* até que estes estejam devidamente armazenados na central. Os circuitos integrados que compõe o circuito de recepção na placa da central de processamento são U1, U2, U3, U4, U5, U11 e U12 (vide Figura 27).

O funcionamento deste tipo de linha se resume no seguinte procedimento: quando a central de processamento requisita aquisição, as unidades de monitoramento deixam o estado da linha de fibra de retorno (RXc) ativa (ou seja, nível alto) até que todas as unidades terminem de fazer a sua aquisição. Neste estado, a unidade de monitoramento está ocupada em realizar as tarefas de amostragem e armazenamento. A Figura 31 apresenta o estado da linha RXc logo após o comando de aquisição (Figura 29).

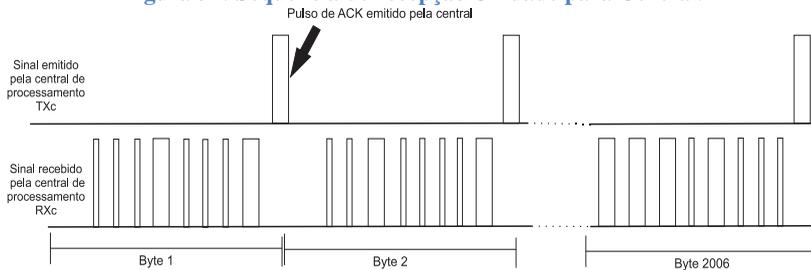


Quando todas as unidades estiverem desocupadas (Linha RXc em nível baixo) a central pode solicitar a transmissão da aquisição feita em cada unidade. A transmissão da aquisição começa com o envio do *byte* de ID da unidade (número específico de cada unidade de monitoramento) seguido pelos dois *bytes* que definem o número de amostras a transmitir. Cada amostra possui dois *bytes*, por isso, a unidade envia um pacote de *bytes* do número de amostras multiplicado por dois. Ao final da transmissão, a unidade envia mais seis *bytes* que são referentes a uma amostra do campo DC medido pelo AMR tridimensional (três amostras de 16 *bits* para cada componente tridimensional x, y e z). O funcionamento de recepção pela central é

análogo ao de transmissão, com a diferença de que a taxa de transferência (*bits/segundo*) é mais elevada, como já mencionado. O pulso de ACK é enviado agora pela central de processamento para a unidade de monitoramento que realizou a transmissão.

A Figura 32 apresenta um exemplo de comunicação da linha RXc-TXu, entre a central de processamento e uma unidade de monitoramento, para a efetuação de uma transmissão com um número de amostras de 1000. O número de *bytes* transmitidos é 2006 *bytes* (1000 amostras vezes 2 *bytes* por amostra + seis *bytes* da amostra de campo DC medido pelo AMR).

**Figura 32: Sequência de recepção Unidade para Central.**

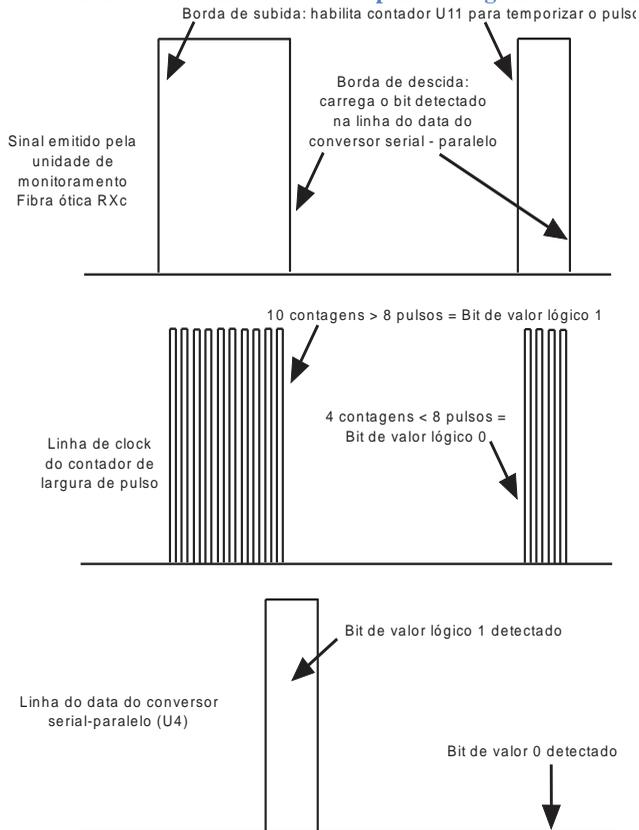


Para a transferência das aquisições realizadas pelas unidades de monitoramento, há um par de fibras ópticas para a comunicação. O funcionamento do hardware específico para a recepção (RXc-TXu), como comentado em sessão anterior, é necessário para processar os *bits* seriais que chegam pela fibra óptica em taxas mais elevadas de transmissão. Isso é processado por hardware, e não através de software como no caso da transmissão (TXc-RXu).

Quando um pulso chega pela fibra óptica, um contador binário (U11 – 74LS93) é habilitado para contar o tempo em que permanece em nível lógico alto. Se o pulso durar oito contagens ou mais, a linha de dados do Conversor serial - paralelo 74LS164 (U4 - vide Figura 27) ficará em nível lógico alto indicando um *bit* de valor lógico "1", caso contrário, o *bit* assume "0". Quando o pulso retornar no estado de nível baixo (borda de descida), o dado é então carregado no conversor serial - paralelo (U4), e o contador binário U2 é incrementado indicando que chegou um *bit*. Esse procedimento é efetuado até que os oito *bits* sejam

carregados em U4, quando então o contador binário U2 envia uma sinalização ao FPGA (residente no CRIO) de que chegou um *byte*. O FPGA lê o *byte* disponibilizado pelo conversor serial – paralelo. Após esse procedimento, o FPGA reinicia o contador U2 e envia o pulso de ACK para a unidade de monitoramento indicando que recebeu o *byte* corretamente. O próximo *byte* então já pode ser enviado até completar a transmissão. A Figura 33 apresenta um diagrama deste procedimento na intenção de facilitar a compreensão.

**Figura 33: Sinais do decodificador de bits para carregamento de dois bits.**



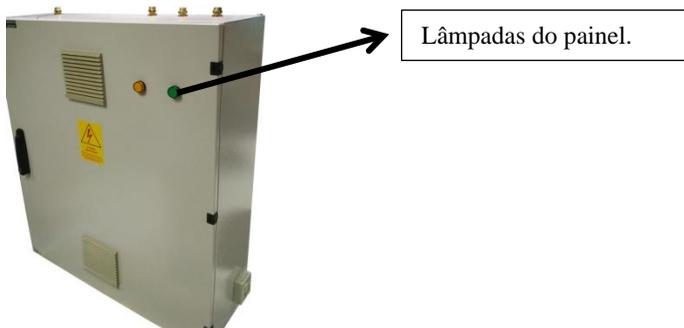
Novamente, neste par de fibras ópticas, existem dois canais de comunicação: canal 1 e canal 2. A comunicação nas unidades não pode

ser efetuada simultaneamente nos dois canais do par de fibras ópticas. Portanto, primeiro há a comunicação com as unidades do canal 1 (ou canal 2), e depois com as unidades do outro canal. A comutação para o canal da fibra óptica é efetuado pela chave analógica 74HC4053 (U6), através de um comando recebido pelo FPGA.

#### 4.4.3 Placa de Sinalização

O equipamento possui uma placa de circuito eletrônico para condicionar o sinal analógico da medição da corrente de neutro (aterramento) do gerador, para desligar/ligar a alimentação das unidades de monitoramento, e para comandar as lâmpadas de sinalização contidas no painel, as quais indicam estados de funcionamento do equipamento. As lâmpadas localizam-se na porta do painel do equipamento (Figura 34) e possuem a função de indicar: estados de defeito no equipamento desenvolvido, operação normal e HD externo cheio (lâmpada verde acesa e a laranja apagada, operação normal; lâmpada verde apagada e a laranja acesa, HD cheio; lâmpada verde e lâmpada laranja piscando alternadamente, defeito no equipamento).

**Figura 34: Painel do equipamento: vista externa.**



#### 4.5 Quadro de comando do painel

No quadro de comando do painel há um disjuntor geral para ligar o equipamento, as proteções contra descargas atmosféricas no neutro e

na fase, um interruptor residual para proteção do CompactRIO e da IHM e um disjuntor para ligar/desligar o ventilador e a tomada de serviço do painel. Também há no painel as fontes do IHM e do CRIO. A fonte do CRIO (24V) alimenta também as unidades de monitoramento através de uma placa de regulação de 24V para 15V.

#### 4.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo tratou-se do hardware desenvolvido e aplicado na central de processamento. Focou-se com mais detalhes para o protocolo de comunicação desenvolvido para operar sobre a fibra ótica. O fundamento básico da comunicação assíncrona desenvolvida, a modulação dos *bits* em largura de pulso foi inspirada na comunicação SPDIF [41] voltada à transmissão de áudio digital em equipamentos eletrônicos domésticos e profissionais. No próximo capítulo tratar-se-á da unidade de monitoramento do equipamento.



## 5. Unidades de monitoramento

Este capítulo trata do funcionamento da unidade de monitoramento, onde ocorre a medição de formas de onda da derivada do campo magnético. A placa da unidade monitoramento possui os dois elementos sensores de campo tratados anteriormente (vide capítulo 3), o sensor por indução e o AMR (U8 – vide Figura 17).

A Figura 35 e a Figura 36 mostram fotos da placa mãe da unidade de monitoramento, indicando os componentes principais. O núcleo de processamento da unidade é um PIC 18F4525 (U6), responsável por fazer o ajuste de ganho na placa de condicionamento analógico comandando as chaves analógicas (U1 e U2 da placa de condicionamento analógico apresentada no capítulo 2), por processar a aquisição do sinal, por armazenar as amostras no *buffer*, por enviar as amostras através de fibra óptica para a central de processamento e para controlar o sistema de transmissão por fibra óptica na unidade de processamento.

**Figura 35: Placa mãe da unidade de monitoramento com indicação dos componentes.**

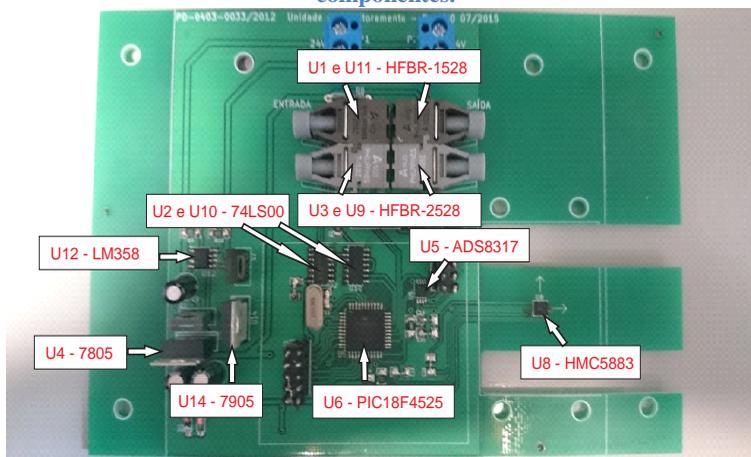
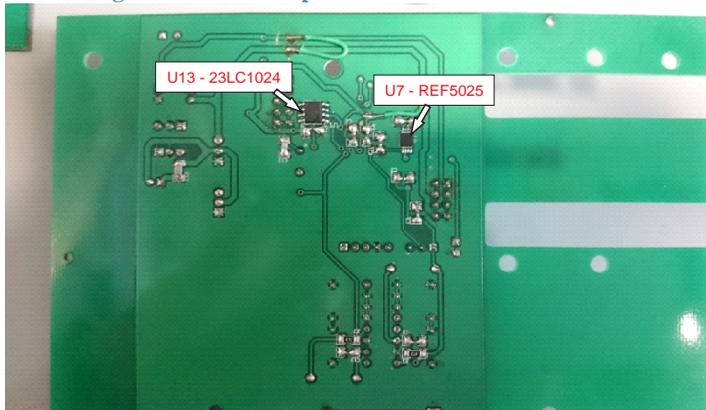


Figura 36: Verso da placa da unidade de monitoramento.



- a) Microcontrolador U6 é o núcleo de processamento da unidade, com uma memória SRAM (U13 – 23LC1024) a qual armazena (*buffer*) as amostras até serem enviadas à central de processamento;
- b) O Conversor A/D totalmente diferencial U5 – ADS8317 – é responsável por amostrar e digitalizar o sinal analógico proveniente do sensor por indução;
- c) Os circuitos integrados que transmitem os sinais digitais por fibra óptica são o U1 – HFBR-1528 (para a central de processamento) e U11 – HFBR-1528 (para a próxima unidade que está em série no sistema – vide Figura 2);
- d) Os circuitos integrados que recebem os sinais digitais são U9 – HFBR-2528 (do sinal que vem da central de processamento) e U3 – HFBR-2528 (do sinal que vem da unidade de monitoramento que está em série no sistema – vide Figura 2);
- e) Os demais circuitos integrados são: i) os componente U2 e U10 (74LS00) são portas *NAND* que invertem o sinal quando necessário; ii) o regulador de tensão U4 (7805) para +5 V do circuito digital e o positivo do circuito de condicionamento analógico; iii) o regulador U14 (7905) para a alimentação da tensão negativa do circuito de condicionamento analógico; iv) os circuitos integrados de referência das fontes de tensão U7 – REF5025

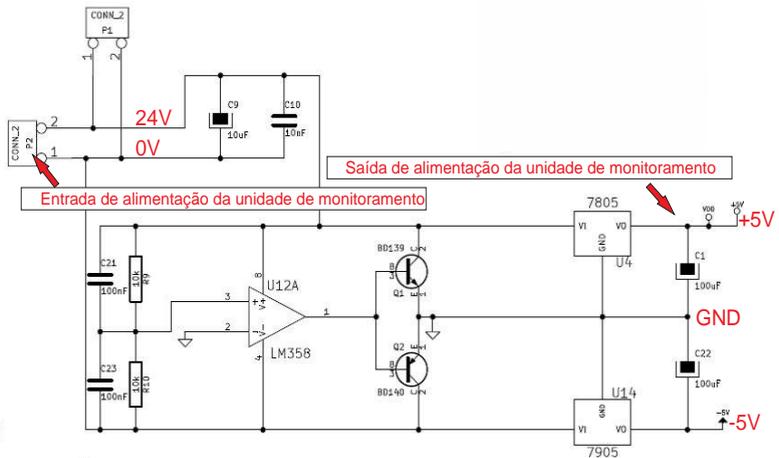
(gerador de tensão de referência de 2,5 V para o conversor A/D) e U12 – LM358 (amplificador operacional para gerar a tensão de referência da fonte da unidade de monitoramento).

A seguir, explicam-se sumariamente os circuitos eletrônicos da unidade de monitoramento.

## 5.1 Fonte

O circuito da fonte de alimentação é mostrado na Figura 37. Esse circuito gera a tensão simétrica de +5 V e -5 V, a partir de uma tensão de alimentação simples (entrada de alimentação da unidade). É composto pelo amplificador operacional LM358 (U12) e pelos reguladores de tensão LM7805 (U4) e LM7905 (U14). Os demais componentes estão especificados no circuito eletrônico da Figura 37.

Figura 37: Circuito da fonte na unidade.



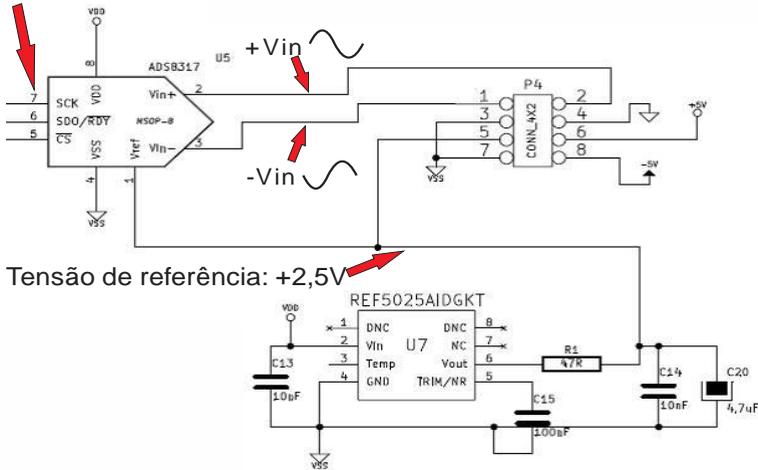
## 5.2 Circuito amostrador e digitalizador do sinal analógico

O circuito eletrônico responsável por amostrar e digitalizar os sinais de tensão proveniente da placa de condicionamento analógico é mostrado na Figura 38, tendo o conversor A/D (U5 – ADS8317) como

elemento principal e o circuito integrado U7 de geração da tensão de referência de 2,5 V.

**Figura 38: Circuito digitalizador do sinal analógico.**

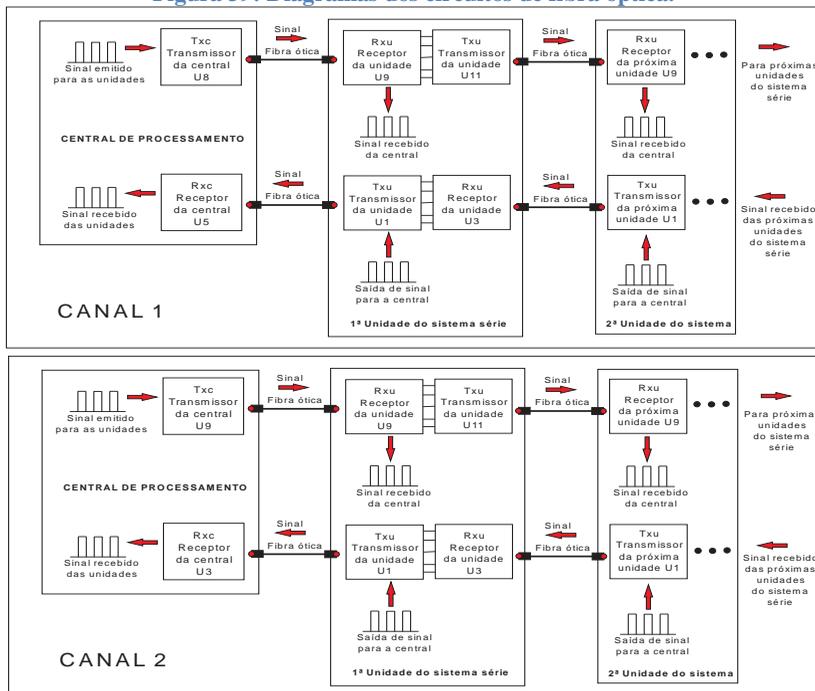
Linhas de comunicação com o microcontrolador



### 5.3 Circuitos eletrônicos de comunicação por fibra óptica

Na Figura 39 apresenta-se um diagrama dos circuitos de fibra óptica incluindo também a central de processamento. Os transmissores/receptores de fibra óptica das unidades são U1, U3, U9 e U11. O diagrama apresenta a central e seus elementos transmissores e receptores, bem como os das unidades de monitoramento e o fluxo de sinais digitais.

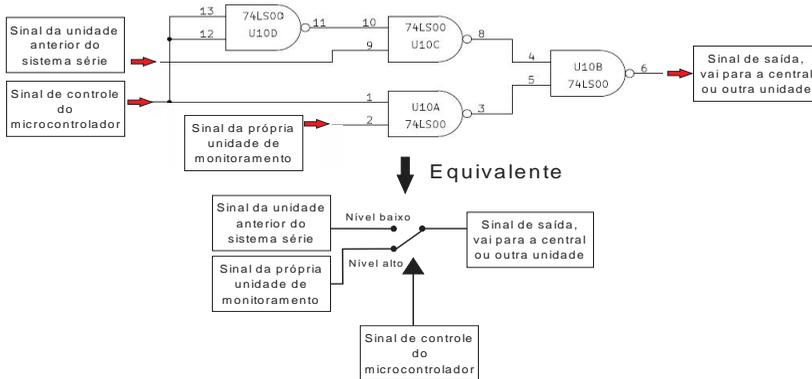
**Figura 39: Diagramas dos circuitos de fibra óptica.**



## 5.4 Circuito comutador do transmissor de fibra óptica

Circuito eletrônico que comuta o transmissor que emite os sinais para a central de processamento é apresentado na Figura 40. Se o sinal de controle está em alto, os sinais emitidos para central serão da própria unidade e provêm do microcontrolador. Se o sinal de controle está em nível baixo, os sinais emitidos para central provêm da unidade de monitoramento anterior no sistema série.

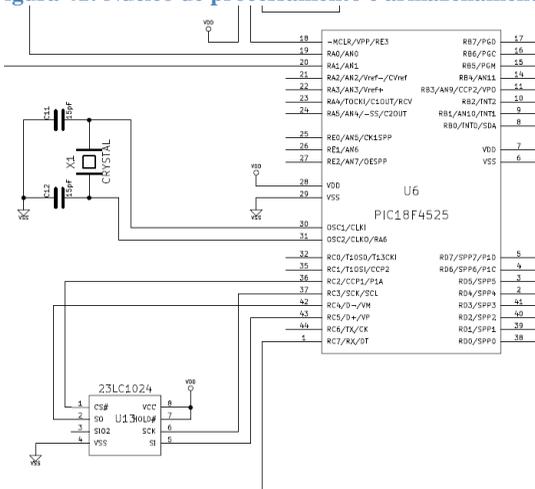
**Figura 40: Circuito comutador do transmissor de fibra óptica.**



### 5.5 Núcleo de processamento e armazenamento

O núcleo de processamento e armazenamento é mostrado pelo circuito composto pelo microcontrolador PIC18F4525 (U6) e pela memória SRAM 23LC1024 (U13 - *buffer*), apresentados na Figura 41.

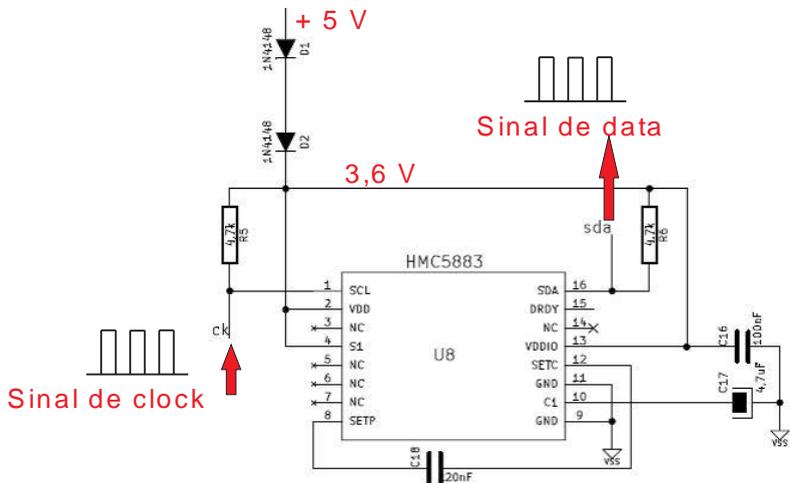
**Figura 41: Núcleo de processamento e armazenamento.**



## 5.6 Circuito medidor de campo DC

O Circuito medidor de campo DC mostrado na Figura 42 é composto pelo sensor AMR HMC5883. Para alimentá-lo foi necessário diminuir a tensão de alimentação de + 5 V da unidade para + 3,6 V (tensão máxima de alimentação) através de dois diodos colocados em série. Este componente se comunica diretamente com o microcontrolador através do protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C. O microcontrolador controla o *clock* e os dados de saída são enviados através da linha *data*.

Figura 42: Circuito medidor de campo DC.



## 5.7 Software do microcontrolador (*firmware*)

A seguir, trata-se do software do microcontrolador (*firmware*). As principais funções do software são as funções de efetuar a aquisição e o de transmitir as amostras para a central de processamento. Isto é, a unidade possui apenas os dois comandos específicos: fazer aquisição e transmitir aquisição, detalhadas a seguir.

### 5.7.1 Comando de aquisição

O comando de fazer aquisição é geral para todas as unidades. Quando esse comando é transmitido pela central de processamento, todas as unidades realizam a aquisição simultaneamente das amostras de tamanho definido pela central de processamento.

Após receber os três *bytes* referentes ao comando de aquisição (conforme detalhado no item 4.2.2), o microcontrolador executa a função correspondente e acende (ativa o nível lógico alto) a linha TXu da fibra, acusando que o processo de aquisição está em andamento. A central de processamento verifica então que a linha está em nível alto e não efetua mais comandos até que a linha seja desocupada (alterada para o nível baixo).

O primeiro passo para efetuar a aquisição é ajustar o ganho do amplificador (essa função será vista adiante). Após este procedimento, o microcontrolador começa a efetuar as medições de amostras e gravá-las no *buffer* de memória da unidade a uma taxa de amostragem de 10 kSps. Terminada as medições do número de amostras, o programa apaga (atribui nível lógico baixo) a linha TXu, acusando que aquisição foi efetuada com sucesso.

### 5.7.2 Comando de transferência de aquisição

O comando de transmitir as amostras possui um ID. É um comando que necessita que a central de processamento identifique a unidade que irá transmitir. A central de processamento envia um comando a todas as unidades, as quais verificam o ID correspondente. Caso o comando seja para a unidade deste ID, ela (a unidade) envia as amostras, caso contrário, ela mantém disponível o transmissor da fibra para comunicação com a unidade que vem em série.

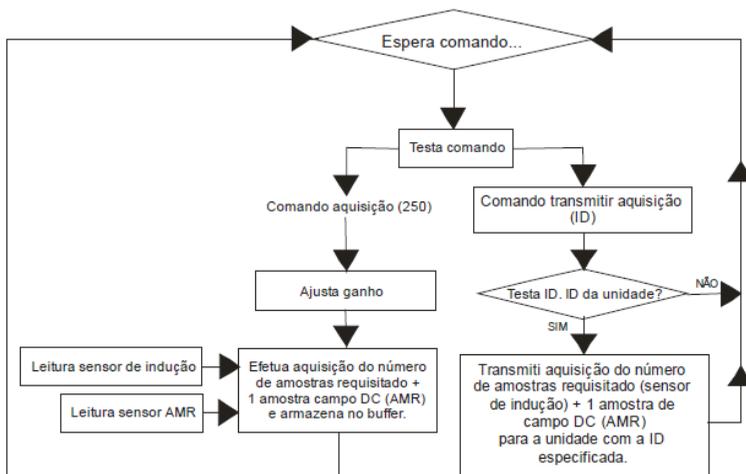
### 5.7.3 Funções secundárias do *firmware*

Algumas funções secundárias do software residente no microcontrolador (U6) são tratadas brevemente a seguir.

- a) **Ganho automático:** para não sobrecarregar a central de processamento com mais uma tarefa que poderia tornar as aquisições lentas, decidiu-se por implementar que o ajuste do ganho do amplificador INA 118 seja realizado automaticamente na própria unidade de monitoramento. Por ser uma tarefa relativamente simples, o microcontrolador da própria unidade realiza esta tarefa com as vantagens de proporcionar rapidez e também de não necessitar trafegar com dados relativos aos ajustes de ganho pelas linhas de fibra óptica. O microcontrolador é capaz de buscar o melhor ganho entre 137 valores de ganho possíveis em um tempo máximo de busca de 0,54 s. O funcionamento do algoritmo é simples: o microcontrolador deve garantir que em um ciclo completo elétrico os níveis de tensão estejam dentro dos limites da tensão de amplificação. Mede-se a tensão de saída do amplificador em laço “*for*” por um intervalo de tempo que pode chegar até 20 ms. Se durante a execução do laço *for* foi detectada uma tensão superior à tensão limite estipulada de saturação do amplificador, ajusta-se a rede de resistores para fornecer um valor de ganho menor e reinicia-se o laço *for*. Com o ganho ajustado e o laço reiniciado, executa-se uma nova medição com duração de no máximo 20 ms para verificar se o nível de tensão do sinal do amplificador está adequado. Não estando adequado, o processo se repete até encontrar o melhor ganho de amplificação.
- b) **Verificação de linha RXu ocupada:** Quando a central de processamento está comunicando com uma unidade de monitoramento, todas as outras unidades devem reconhecer que isto está ocorrendo, bloqueando-se para o recebimento de comandos. Isto é feito por uma função verificadora de ociosidade da linha RXu. Se estiver ociosa por um tempo superior a 4ms, todas as unidades de monitoramento se desbloqueiam e ficam disponíveis a espera de um comando da central de processamento. Quando uma unidade está comunicando com a central de processamento, a linha TXu fica indisponível para as outras unidades. Quando finalizada a comunicação, a linha TXu fica disponível para a comunicação com as outras unidades de monitoramento.

- c) **Função principal do código:** A função principal do programa do microcontrolador é um laço de execução contínua com os seguintes processos sequenciais: o microcontrolador espera receber um *byte* de comando da central de processamento, verifica se o *byte* de comando é referente ao de aquisição ou se é de transmissão de amostras. Caso não seja de nenhum desses comandos, o programa entra na função de verificar se a linha RXu está ociosa ou não. Se o *byte* é referente ao comando de aquisição, o programa entra na função de amostragem e digitalização do sinal. Caso o *byte* seja referente ao comando de transferência de amostras, a unidade de monitoramento envia as amostras. Por fim, quando a linha RXu ficar ociosa por mais de 4 ms, o programa retorna ao início e espera receber um novo *byte* de comando, iniciando então uma nova iteração do laço infinito. A Figura 43 mostra o fluxograma do programa: na função de aquisição, o programa faz os seguintes procedimentos: faz o ajuste automático do ganho, efetua aquisição do número de amostras requisitada pela central a uma taxa de 10000 amostras por segundo e armazena no *buffer*. Na função de transmitir aquisição, o microcontrolador transmite então o número de amostras requisitado anteriormente no comando de aquisição.

Figura 43: Fluxograma do *software* no *firmware* do microcontrolador.



## 5.8 Considerações finais do capítulo

Apresentou-se neste capítulo as unidades de monitoramento, descrevendo resumidamente seus circuitos eletrônicos e também o programa (*firmware*) residente no microcontrolador PIC18F4525 (U6). Foram construídas 10 unidades de monitoramento para o equipamento. Foram instaladas apenas 7 na unidade geradora na usina, sendo 6 do lado interno do *housing* do gerador e 1 (uma) do lado externo. Fotos da instalação na usina são apresentadas no capítulo 7 deste trabalho. No capítulo 6 apresenta-se o principal *software* do equipamento e residente no CRIO da central de processamento.



## 6. *Software* residente na Central de Processamento

O *software* desenvolvido para o controle do equipamento e análise das medições efetuadas foi concebido com o objetivo de detectar alterações de amplitudes das componentes no espectro de frequência de cada aquisição. Essas alterações, quando ocorrem, devem-se a quatro motivos principais: i) às oscilações das correntes da máquina; ii) aos erros aleatórios inerentes a operação contínua do equipamento; iii) à mudança do ponto de operação da máquina; e iv) a uma possível falta incipiente que surja na máquina. O objetivo principal do *software*, isto é, também do equipamento, é detectar as variações em assinaturas magnéticas da máquina devido ao quarto motivo.

Este trabalho teve como objetivo a implementação do equipamento, principalmente, e levou cerca de dois anos para ser realizado. Assim, no estágio atual do nível da pesquisa, é difícil desenvolver um *software* que possa discernir as alterações nas assinaturas magnéticas causadas pela mudança do ponto de operação da máquina e as causadas pelas faltas. Nesta primeira etapa da pesquisa, elaborou-se um software que efetue análises a cada aquisição realizada e que detecte qualquer alteração ocorrida. A proposta de análise efetuada pelo programa é simples: verifica-se a alteração ocorrida entre a aquisição atual e a aquisição anterior. Caso esta alteração ultrapasse um limite imposto assumido como normal, dispara-se o salvamento do arquivo da aquisição com um conjunto de informações evidenciando a frequência da raia cuja amplitude mais se alterou, e em qual unidade de monitoramento essa variação ocorreu. Alterações lentas ocasionadas no espectro as quais não ultrapassam o limite imposto como normal (advindas de faltas incipientes ou não), são capturadas através dos gatilhos de aquisição periódicos. Estas alterações somente poderão ser analisadas pelo operador do equipamento, pois envolvem a comparação simultânea do ponto de operação da máquina com sua assinatura magnética.

Para elucidar o que se pretende que o programa analise, considera-se uma máquina elétrica que possui um espectro característico dependente do número de polos. A primeira componente deste espectro é menor que a fundamental elétrica de operação da máquina quando essa possui um número de polos maior que dois. O valor da frequência desta componente  $f_m$  é dado pela Eq. 6.1 [1,39,42]. Esta frequência

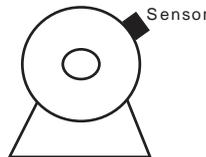
corresponde à fundamental mecânica da máquina, onde  $f_e$  é a frequência elétrica e  $P$  é o número de polos da máquina.

$$fm = \frac{2f_e}{P} \quad \text{Eq. 6.1}$$

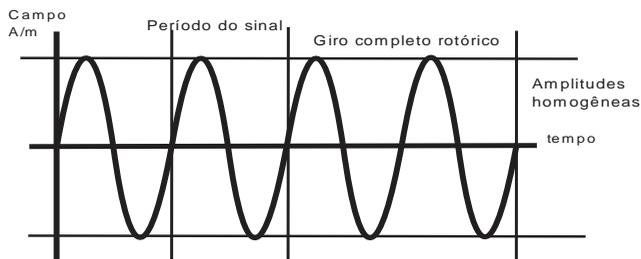
O surgimento das componentes espectrais fundamental mecânica e suas harmônicas (com exceção das harmônicas da fundamental elétrica) devem-se ao fato de que a máquina, mesmo sendo considerada sadia, não ser perfeitamente ideal. A não homogeneidade dos polos e ranhuras, assim como a anisotropia do aço e pequenas imperfeições mecânicas de construção, fazem com que essas componentes estejam presentes. Uma falta na máquina, no entanto, agrava esta situação distanciando mais a máquina da idealidade e, conseqüentemente, fazendo com que essas componentes aumentem ou diminuam as suas amplitudes em relação a um estado considerado mais sadio.

Para exemplificar de forma simples o surgimento da fundamental mecânica, considera-se uma máquina de quatro polos. A forma de onda do campo magnético medido na máquina sadia é apresentada na Figura 45 para um ponto de medição próximo à carcaça, como ilustrado na Figura 44. O sinal de campo para um ciclo de giro rotórico completo para uma máquina de quatro polos envolve dois ciclos elétricos, conforme apresentado na Figura 45. Supondo que os polos 3 e 4 passam a gerar uma amplitude menor do que os polos 1 e 2, o sinal resultante de campo medido no sensor será no formato como apresentado na Figura 46. Este sinal (Figura 46) passa a apresentar uma componente de frequência equivalente à metade da frequência elétrica do sinal, e equivalente à frequência fundamental mecânica da máquina.

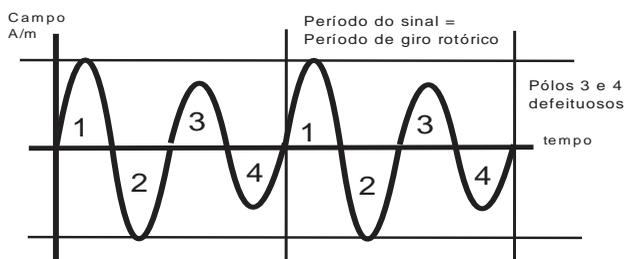
**Figura 44: Sensor posicionado em um ponto específico da carcaça.**



**Figura 45: Sinal medido em uma máquina sadia.**



**Figura 46: Sinal medido em uma máquina com os polos 3 e 4 defeituosos.**



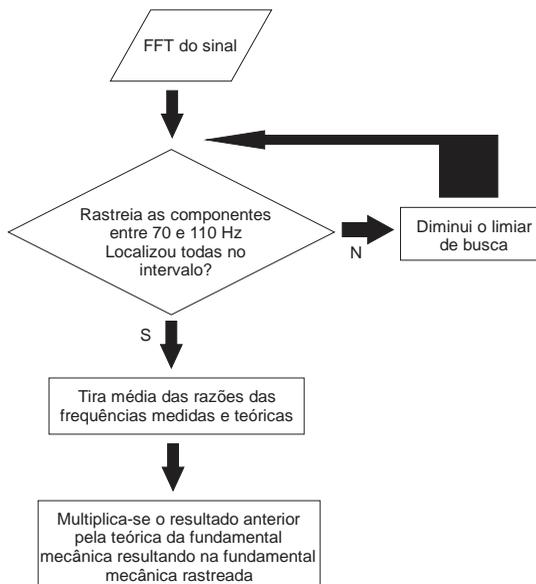
## 6.1 Algoritmo de rastreamento da fundamental mecânica

Para que o programa possa rastrear adequadamente cada componente de frequência presente no espectro é necessário saber onde exatamente cada uma irá estar. A frequência fundamental mecânica nos fornece diretamente a informação de velocidade rotórica. Todas as demais componentes serão múltiplas (harmônicas) desta raiz de frequência, inclusive a fundamental elétrica e suas harmônicas. O código de rastreamento desenvolvido para o equipamento foi otimizado para encontrar frequências mecânicas muito baixas (menores do que 5Hz), necessário na aplicação de máquinas hidráulicas, onde o número de polos é alto.

Para rastrear corretamente a fundamental mecânica, e consequentemente a velocidade rotórica, faz-se uso de uma faixa de espectro próximo à fundamental elétrica, mas que não a tenha e nem suas harmônicas. Uma das justificativas para este procedimento é garantir que componentes de frequência elétricas provenientes de outros

equipamentos e instalações não interfiram no processo. O código desenvolvido utiliza a faixa do espectro entre o 70 Hz e o 110 Hz e rastreia toda componente mecânica que deveria existir neste intervalo com uma tolerância de 1 Hz para mais ou para menos. O rastreamento acontece da seguinte forma: o programa irá procurar todos os máximos acima de certo limiar e em torno das frequências harmônicas mecânicas teóricas. Caso ele não ache um máximo em torno de uma harmônica mecânica, com tolerância de 1 Hz para mais ou para menos, o programa diminui 1dB do limiar e refaz o procedimento de busca. O programa ficará neste procedimento até achar as harmônicas. Se por ventura, dentro da tolerância 2 Hz (1 Hz para mais ou para menos) ele encontrar mais de um máximo, ele considera a frequência detectada do máximo correspondente mais próximo a frequência mecânica teóricas dentro da tolerância de busca da frequência. O programa, então, calcula as razões entre os valores de frequências encontradas e os valores das frequências teóricas. Ao final, obtém-se uma média dessas razões, resultando um valor entre 0,99 e 1,01 correspondente ao desvio da frequência mecânica em relação à frequência teórica. Multiplica-se este valor pela frequência fundamental mecânica teórica e se obtém então a frequência fundamental mecânica rastreada. A Figura 47 apresenta um fluxograma do algoritmo.

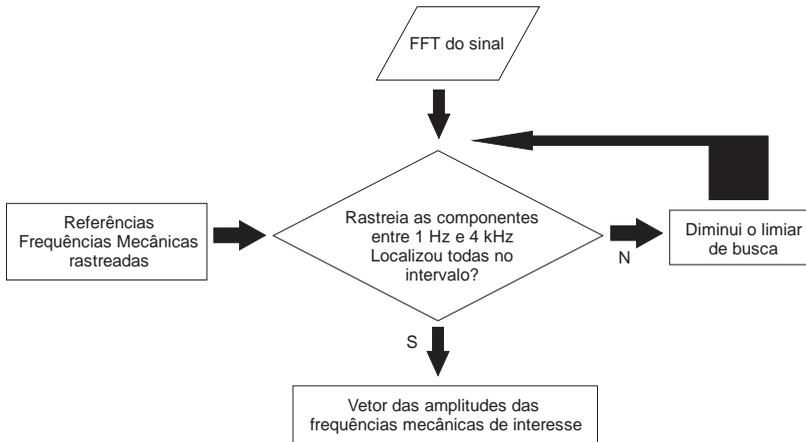
**Figura 47: Fluxograma do algoritmo.**



## 6.2 Algoritmo para rastrear todas as harmônicas de interesse

Uma vez obtida a frequência mecânica rastreada, busca-se então as múltiplas deste valor até o limite de frequência de interesse (no caso do equipamento desenvolvido neste trabalho é de 4 kHz). Esse limite é imposto nas configurações do programa, levando em conta a frequência de corte do filtro analógico do circuito de tratamento de sinal. O algoritmo que rastreia as componentes harmônicas mecânicas é o mesmo que empregado para encontrar a fundamental mecânica medida. No entanto, em vez de rastrear em torno das frequências mecânicas teóricas, o programa busca as frequências em torno das múltiplas da frequência mecânica rastreada, varrendo o espectro de 1 Hz até a frequência máxima definida (4 kHz). Ao final se obtém um vetor contendo os valores das amplitudes das frequências mecânicas de interesse, iniciando da menor frequência para a maior. A seguir, na Figura 48 apresenta-se o fluxograma do algoritmo.

**Figura 48: Fluxograma do algoritmo.**



### 6.3 Procedimento de detecção de variação espectral

O algoritmo destinado a detectar variações de amplitudes no espectro utiliza a diferença absoluta para cada raia entre a última aquisição efetuada e a penúltima. Este algoritmo evidencia dois tipos de variação, pela detecção da amplitude da componente harmônica que mais se alterou e a variação total média do espectro. Caso algum destes dois tipos de variação tenha uma alteração além de um valor estipulado pelo usuário, acionam-se procedimentos de salvamento do vetor de tensão correspondente à forma de onda da derivada do campo magnético medida pelo sensor. Quando isso ocorre, o algoritmo fornece um conjunto de informações indicando a componente espectral que mais se alterou e em qual unidade de monitoramento ocorreu. Neste caso, também fornece a variação total média espectral (envolvendo todas as componentes harmônicas de todas as unidades de monitoramento).

### 6.4 Procedimento de geração de histórico espectral

O *software* desenvolvido, além de ter um procedimento de detecção de variação espectral memorizando eventos, também constrói um histórico memorizado de medições contendo todas as amplitudes das

componentes relativas a todas as aquisições efetuadas. Cada componente do espectro possui um arquivo de suas amplitudes medidas por todas as unidades de monitoramento ao longo do tempo. Para cada novo conjunto de aquisições realizadas pelas unidades de monitoramento adiciona-se os novos valores das componentes. Os arquivos do histórico têm nomes referentes à componente de frequência. Portanto, existem tantos arquivos quantas componentes de frequência do espectro forem monitoradas. Um exemplo da estrutura de um arquivo pode ser visto na Figura 49, onde o nome do arquivo se refere a frequência de 12,5 Hz no qual as amplitudes estão sendo salvas. A primeira coluna do arquivo traz a informação de hora e data de salvamento das amplitudes, e as demais colunas contêm os vetores de amplitudes da componente nas várias unidades de monitoramento. A primeira linha do arquivo apresenta o nome das unidades de monitoramento, o qual são normalmente nomeadas por posição em graus da unidade de monitoramento no gerador (Ex.: Pos 270°).

O *software* também apresenta um gráfico de amplitudes relativas ao instante de tempo que a medida foi efetuada de algumas componentes harmônicas pré-estabelecidas. São apresentadas as últimas 100 aquisições efetuadas: o programa mantém uma pilha de 100 aquisições. A cada aquisição efetuada, a centésima aquisição anterior é descartada e todas as demais aquisições são deslocadas para dar lugar à nova aquisição (memória do tipo *FIFO* – *First in, First out*). Isto facilita o usuário a acompanhar em tempo real o comportamento de algumas componentes.

Os arquivos de histórico são únicos e seu tamanho cresce indefinidamente até preencher o espaço de memória do disco rígido (HD). Quando isto ocorrer, o programa acusa um erro e deixa de executar suas funções. O número de frequências salvas é determinado por um limite superior de frequência. Por exemplo, se o limite superior for imposto em 2 kHz, e a fundamental mecânica for 12,5 Hz, então os nomes dos arquivos serão da seguinte maneira: 0,0Hz.txt, 12,5Hz.txt, 25,0Hz.txt, ... , e terminarão em, ..., 1987,5Hz.txt, 2000,0Hz.txt.

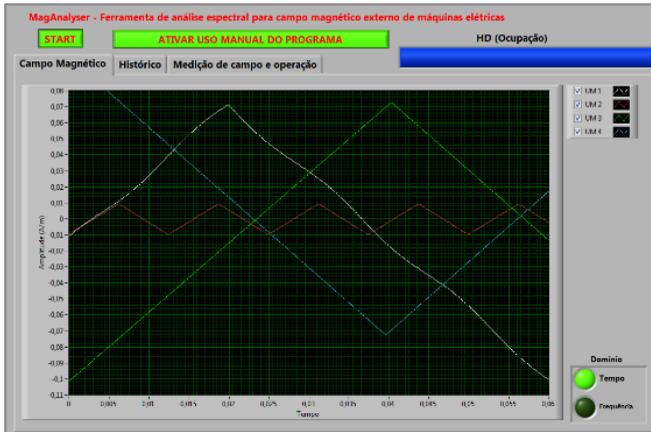


Das funções de trabalho visuais na IHM, o programa possui três abas denominadas por: Campo Magnético, Histórico (das 100 últimas aquisições) e Medição de Campo e Operação. Na parte superior do painel frontal do programa mostrado na IHM, e apresentada na Figura 50, existem dois botões e um indicador de estado de ocupação do disco rígido (HD), onde são armazenadas as medições. A função do botão START é parar ou executar o programa (se a cor do botão for verde, significa que o programa está sendo executado. Caso for na cor preta, o programa está parado). O Botão ATIVAR USO MANUAL DO PROGRAMA ativa ou desativa a alteração automática de abas a cada aquisição (se ficar na cor verde, então o programa está no modo manual, e se na cor preta, o programa está no modo automático).

### **6.6.1 Aba Campo Magnético**

Na aba Campo Magnético, pode-se visualizar formas de onda do campo magnético medido em todas as unidades de monitoramento, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (Figura 50). Para acessar o domínio de frequência ou de tempo, muda-se o controle de domínio através dos botões inferiores do lado direito. Pode-se também omitir a exibição do gráfico das formas de onda em função das posições (sensores) não desejadas. Os sinais contidos na janela do programa são sinais simulados para validação do programa e devem ser desconsiderados.

Figura 50: Campo magnético no domínio do tempo.



## 6.6.2 Aba Histórico

Na aba Histórica (vide Figura 51), como já mencionado, são apresentadas as últimas 100 aquisições de algumas frequências escolhidas. Dentre as frequências escolhidas para apresentação no programa, pode-se selecionar a desejada escolhendo-a no controle Frequência, posicionado no canto inferior direito. A Figura 52 mostra em detalhe este botão de controle. Também aqui pode-se omitir as componentes não desejadas de serem visualizadas.

Figura 51: Aba histórico.

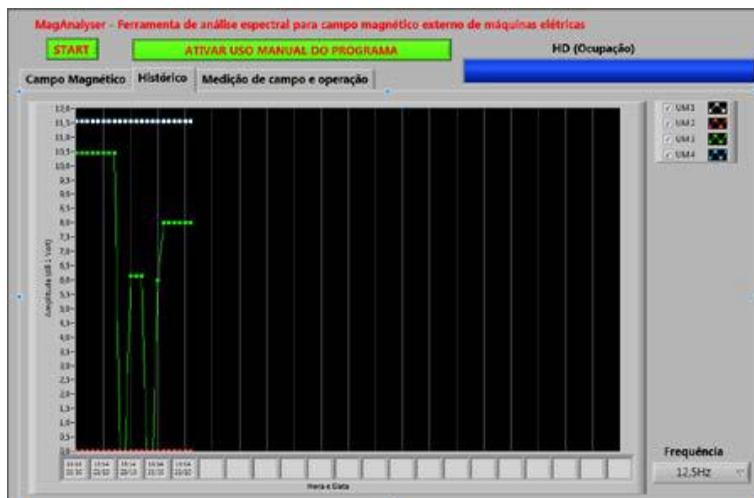
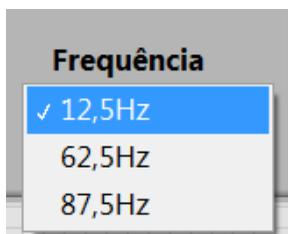


Figura 52: Controle para escolha da frequência.

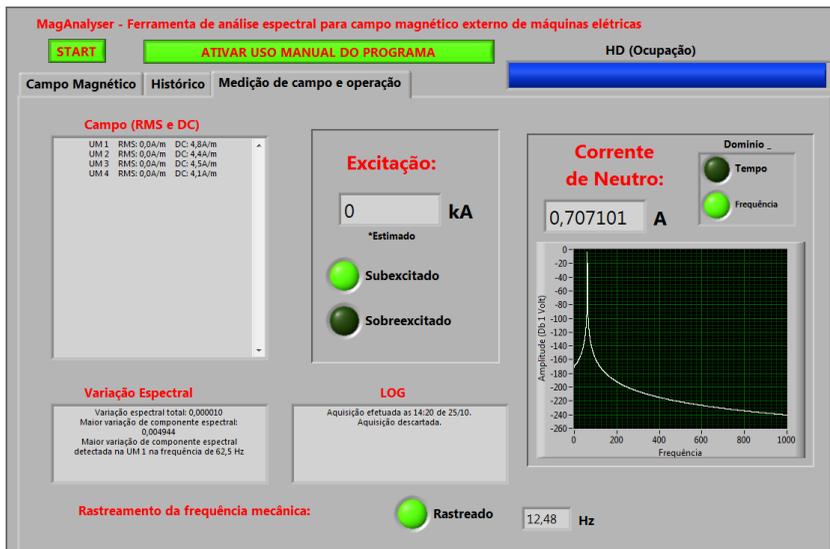


### 6.6.3 Aba Medição de Campo e Operação

Na aba Medição de Campo e Operação (Figura 53) podem ser verificadas informações a respeito do valor RMS do campo sem a componente DC, a componente DC do campo, um indicador com informações e estimativa da corrente de excitação, indicador com informações da corrente de neutro, uma janela de informações sobre a variação espectral e uma janela de registro/acompanhamento (Log) sobre o procedimento de salvamento/memorização de aquisições. Na parte de baixo do painel existe também um indicador de rastreamento da frequência fundamental mecânica da máquina. A lâmpada “Rastreado”

liga (fica na cor verde) sempre que a frequência foi encontrada dentro de um limite de erro aceitável.

**Figura 53: Aba Medição de campo e operação.**



## 6.7 Funções do software não disponibilizadas ao operador

As funções do software não disponibilizadas ao operador são de gravação de arquivos de histórico (apresentado anteriormente) e gerenciamento de aquisições. São salvos pelo programa quatro tipos de arquivos: histórico, aquisições do vetor de tensão, aquisições de neutro e variação espectral. Os arquivos são salvos na sua respectiva pasta com nome conforme o tipo de arquivo.

A partir da frequência mecânica rastreada, o programa realiza a busca de todas as frequências harmônicas da mecânica. A cada aquisição o programa grava nos arquivos de histórico suas amplitudes. Se a amplitude de certa componente ficar abaixo de um limiar mínimo de monitoramento (limiares configurados com base na referência dB 1V), o programa assume que a amplitude da componente fica 10 dB acima do ruído de fundo.

### 6.7.1 Aquisições do vetor de tensão na bobina sensora

As aquisições do vetor de tensão na bobina sensora são salvas em dois gatilhos: periódico (aquisições são memorizadas com um intervalo de tempo fixo) e por variação espectral (aquisições são salvas esporadicamente). No gatilho do tipo periódico, as aquisições são efetuadas em intervalos de tempo fixos, realizadas automaticamente pelo equipamento. O operador define o intervalo de tempo na configuração do programa. O gatilho do tipo variação espectral é realizado também automaticamente pelo programa, mas em intervalos variáveis, os quais dependem do grau da variação da assinatura magnética. Se ocorrer uma variação de amplitude de alguma componente em relação às duas últimas memorizações, em um valor acima de um limiar, o gatilho é acionado e são salvas as formas de onda de ambas as aquisições. O valor do limiar é definido pelo operador.

As aquisições do vetor de tensão já levam em conta o valor do ganho dos amplificadores. Por isso, esse vetor corresponde à tensão nos terminais do sensor por indução de cada unidade de monitoramento. A hora e a data da aquisição são registradas no nome dos arquivos memorizados, como também como foi definida a sua memorização: por variação espectral ou periódica. A estrutura do arquivo de aquisição é apresentada na Figura 54. São gravadas as seguintes informações: período de amostragem, ganhos dos amplificadores em cada unidade, log (registro) da variação espectral e os vetores de tensão adquiridos em cada unidade de monitoramento.

Figura 54: Arquivo de aquisições do vetor de tensão.

```

Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
dt: 0,000100

Ganhos:
UM 1: 1,000000
UM 2: 1,000000
UM 3: 1,000000
UM 4: 1,000000

Variação espectral total: 0,000010
Maior variação de componente espectral:
0,004954
Maior variação de componente espectral
detectada na UM 1 na frequência de 62,5 Hz

UM 1    UM 2    UM 3    UM 4
4,7863  4,4250  4,4626  4,1254
4,8249  4,4250  4,4626  4,1254
4,8634  4,4250  4,4626  4,1254
4,9018  4,4250  4,4626  4,1254
4,9401  4,4250  4,4626  4,1254
4,9780  4,4250  4,4626  4,1254
5,0158  4,4250  4,4626  4,1254
5,0531  4,4250  4,4626  4,1254
5,0901  4,4250  4,4626  4,1254
5,1266  4,4250  4,4626  4,1254
5,1626  4,4250  4,4626  4,1254
5,1981  4,4250  4,4626  4,1254
5,2329  4,4250  4,4626  4,1254
5,2671  4,4250  4,4626  4,1254
5,3006  4,4250  4,4626  4,1254
5,3333  4,4250  4,4626  4,1254
5,3652  4,4250  4,4626  4,1254
5,3962  4,4250  4,4626  4,1254
5,4263  4,4250  4,4626  4,1254
5,4554  4,4250  4,4626  4,1254
5,4836  4,4250  4,4626  4,1254
5,5107  4,4250  4,4626  4,1254
5,5368  4,4250  4,4626  4,1254
5,5617  4,4250  4,4626  4,1254
5,5855  4,4250  4,4626  4,1254
5,6081  4,4250  4,4626  4,1254
5,6295  4,4250  4,4626  4,1254
5,6496  4,4250  4,4626  4,1254
5,6684  4,4250  4,4626  4,1254
5,6880  4,4250  4,4626  4,1254
  
```

## 6.7.2 Aquisições de Neutro

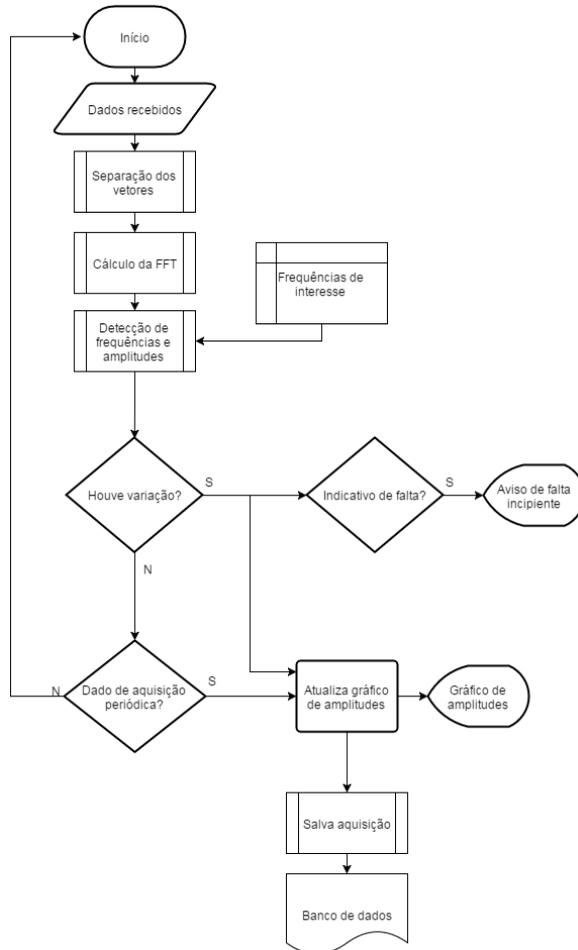
As aquisições da corrente de neutro são efetuadas com o mesmo procedimento apresentado anteriormente. O formato do arquivo é simples, contendo apenas um vetor de tensão. O nome do arquivo é função da hora e data da aquisição.

## 6.8 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, apresentou-se o programa residente no CRIO alojado na central de processamento. O programa gerencia todos os processos e análises FFT, efetua o controle das unidades de monitoramento e efetua o processo de gravação dos arquivos de

aquisições. Um fluxograma geral do programa é apresentado na Figura 55. O próximo capítulo mostra algumas medições/operações do equipamento desenvolvido.

**Figura 55: Fluxograma geral do programa.**





## 7. Resultados de funcionamento do equipamento

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e implementar um equipamento para ser instalado em unidades geradoras em usinas de energia elétrica. No trabalho, não se objetivou fazer estudos sobre a detecção de faltas. Assim, neste capítulo, apresentam-se resultados que comprovam a operação do equipamento instalado em uma usina hidroelétrica. Mostrar-se-á a funcionalidade do algoritmo de rastreamento de frequências de interesse e resultados de medições na usina.

A Figura 56 mostra o painel da central de processamento instalado em uma unidade geradora de 295 MVA, 56 polos, em uma hidrelétrica. A Figura 57 mostra uma foto de uma unidade de monitoramento instalada dentro do compartimento da unidade geradora. Ela está posicionada a aproximadamente 1,5 metros de parede interna do gerador (Figura 58) e orientada de forma a deixar o eixo da bobina sonda na horizontal (Figura 59).

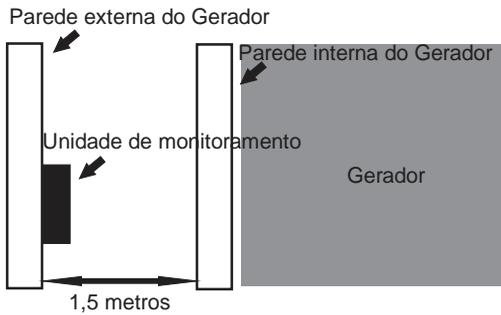
**Figura 56: Painel da central de processamento instalado em uma unidade geradora.**



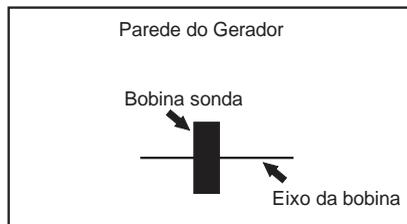
**Figura 57: Unidade de monitoramento instalado em uma usina hidroelétrica.**



**Figura 58: Diagrama de localização da unidade no gerador.**



**Figura 59: Orientação da bobina sonda em relação a parede externa do gerador.**



## 7.1 Eficácia do algoritmo de rastreamento da fundamental mecânica

No estudo desenvolvido em [1], no qual se baseia este trabalho, a detecção de defeitos em geradores é realizada através de variações em espectros de frequência. Assim, os valores das frequências das componentes necessitam ter uma precisão adequada a uma análise. Embora este trabalho não trate especificadamente da detecção e análise de faltas em máquinas elétricas, mas sim do desenvolvimento do instrumento destinado a este fim, para o adequado funcionamento do equipamento, é imprescindível uma precisão alta na medição do valor de frequência da fundamental mecânica. Quanto menor for a rotação da máquina, um maior grau de precisão de determinação do valor da frequência da fundamental mecânica é requerido. A resolução espectral da decomposição FFT do equipamento desenvolvido é de 0,16 Hz. A resolução espectral é dada pelo inverso do tempo de aquisição  $T_{aq}$  conforme Eq. 7.1.

$$dF = \frac{1}{T_{aq}} = \frac{1}{6,25 \text{ s}} = 0,16 \text{ Hz} \quad \text{Eq. 7.1}$$

Como visto no item 6.1, o código de rastreamento da fundamental mecânica utiliza a faixa de espectro de 70 a 110 Hz para geradores hidráulicos de baixa rotação (menores do que 300 rpm). A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no rastreamento da frequência mecânica para o gerador onde está instalado o equipamento. Mostra-se as frequências medidas dentro da faixa de análise, as frequências calculadas teoricamente sob velocidade nominal, e a razão entre os valores medidos e teóricos. A aquisição destes resultados foi efetuada às 0 horas e 0 minutos de 12 de novembro de 2015. A frequência mecânica rastreada resultou em 2,14295 Hz, sendo que a nominal desta máquina é 2,142857 Hz. Desprezando uma possível operação da máquina levemente fora de sua velocidade nominal, o desvio geral fica em 0,000093 Hz o que equivale a 0,0045 %. Obviamente nesta aquisição, o sistema mediu a fundamental mecânica com erro desprezível. Em ensaios efetuados em bancada, verificou-se que no pior dos casos, o erro

de rastreamento mecânico permaneceu abaixo de 0,5 %. As frequências teóricas são obtidas através da Eq. 7.2, onde  $n$  é um inteiro positivo.

$$F_{teo} = n \times \text{Freq. teórica mecânica (2,14 ... Hz)} \quad \text{Eq. 7.2}$$

**Tabela 1: Rastreamento das frequências entre 70 e 110 Hz.**

<b>Frequências medidas (Fmed) [Hz]</b>	<b>Frequências teóricas (Fteo) [Hz]</b>	<b>Razões entre as frequências (Fmed/Fteo)</b>
70,0343	70,7143	0,9904
72,8171	72,8571	0,9995
75,1200	75,0000	1,0016
77,1029	77,1429	0,9995
79,4057	79,2857	1,0015
81,3886	81,4286	0,9995
83,6914	83,5714	1,0014
85,8343	85,7143	1,0014
87,8171	87,8571	0,9995
89,9600	90,0000	0,9996
92,1029	92,1429	0,9996
94,2457	94,2857	0,9996
96,5486	96,4286	1,0012
98,5314	98,5714	0,9996
100,6740	100,7140	0,9996
102,9770	102,8570	1,0012
104,9600	105,0000	0,9996
107,2630	107,1430	1,0011
109,2460	109,2860	0,9996
111,3890	111,4290	0,9996

## 7.2 Eficácia do algoritmo de rastreamento das frequências mecânicas de interesse

Verificou-se uma boa robustez do código para detecção das harmônicas de interesse. Até a faixa de 1 kHz onde as amplitudes das componentes de interesse são expressivas, o código detecta satisfatoriamente as amplitudes. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no rastreamento da faixa de espectro entre 1 Hz e 61 Hz. Os valores de razões obtidos permanecem abaixo de 1,02 e acima de 0,98, indicando um bom rastreamento. É importante observar que estes resultados são o erro em função das componentes mecânicas rastreadas e não das frequências mecânicas teóricas como no caso do item 7.1. Sendo as frequências rastreadas dadas pela Eq. 7.3.

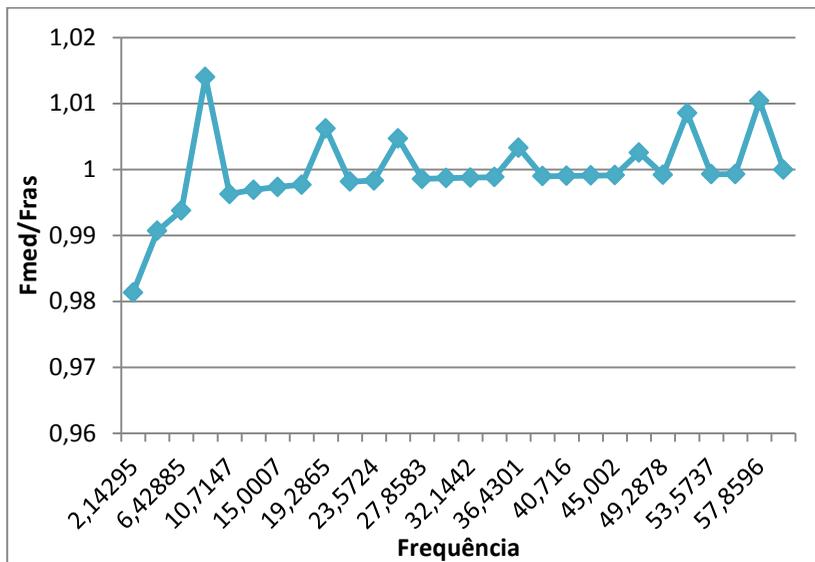
$$Fras = n \times Freq. rastreada \quad \text{Eq. 7.3}$$

**Tabela 2: Rastreamento de componentes harmônicas entre 1 e 61 Hz.**

<b>Frequências medidas (Fmed) [Hz]</b>	<b>Frequências rastreadas (Fras) [Hz]</b>	<b>Razões entre as frequências (Fmed/Fras)</b>
2,1030	2,1430	0,9813
4,2459	4,2859	0,9907
6,3889	6,4289	0,9938
8,6918	8,5718	1,0140
10,6747	10,7147	0,9963
12,8177	12,8577	0,9969
14,9607	15,0007	0,9973
17,1036	17,1436	0,9977
19,4065	19,2865	1,0062
21,3895	21,4295	0,9981
23,5325	23,5724	0,9983
25,8354	25,7154	1,0047
27,8183	27,8583	0,9986
29,9613	30,0013	0,9987
32,1043	32,1442	0,9988
34,2472	34,2872	0,9988
36,5502	36,4301	1,0033
38,5331	38,5731	0,9990
40,6760	40,7160	0,9990
42,8190	42,8590	0,9991
44,9619	45,0020	0,9991
47,2649	47,1449	1,0026
49,2478	49,2878	0,9992
51,8708	51,4308	1,0086
53,5337	53,5737	0,9993
55,6767	55,7167	0,9993
58,4596	57,8596	1,0104
60,0000	60,0026	1,0000

A Figura 60 apresenta esses resultados em forma de gráfico para melhor visualização.

**Figura 60: Gráfico de erro em função da frequência.**



Para frequências maiores os erros sempre irão permanecer abaixo de 2 % pois a tolerância máxima de variação a partir da frequência de rastreamento é de 1 Hz para mais ou para menos.

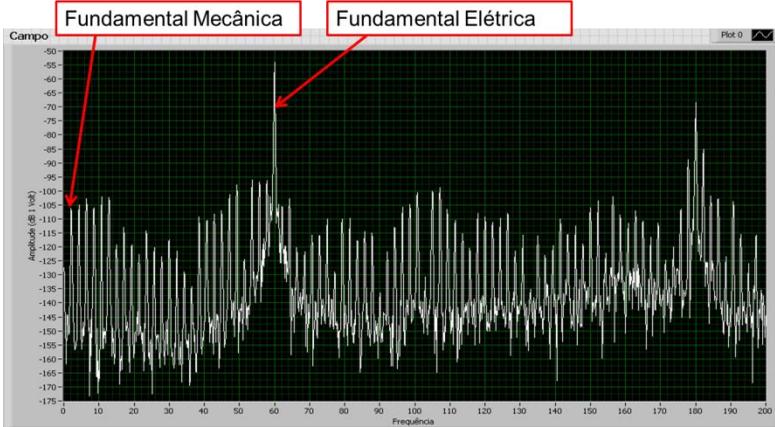
### 7.3 Medições em campo com o equipamento instalado

Neste item, apresentam-se alguns dos primeiros resultados obtidos com o equipamento instalado em uma unidade geradora na hidrelétrica. Alguns eventos de variações de operação da máquina foram capturados.

A Figura 61 apresenta a assinatura magnética até 200 Hz. Como se pode verificar, a amplitude da fundamental mecânica é quase 50 dB menor do que a da fundamental elétrica. Mesmo assim, estas amplitudes são expressivas, visto que a amplitude média de ruído de fundo naquele ambiente é de cerca de -145 dB. A assinatura magnética é rica em informações para trabalhos futuros de detecção de faltas. Isto demonstra também que o equipamento desenvolvido é sensível às componentes de baixas amplitudes. A amplitude da fundamental elétrica de campo é de

cerca de 60 A/m, o que corresponde a uma amplitude de aproximadamente 0,19 A/m para a fundamental mecânica.

**Figura 61: Assinatura magnética até 200Hz no gerador síncrono instalado.**



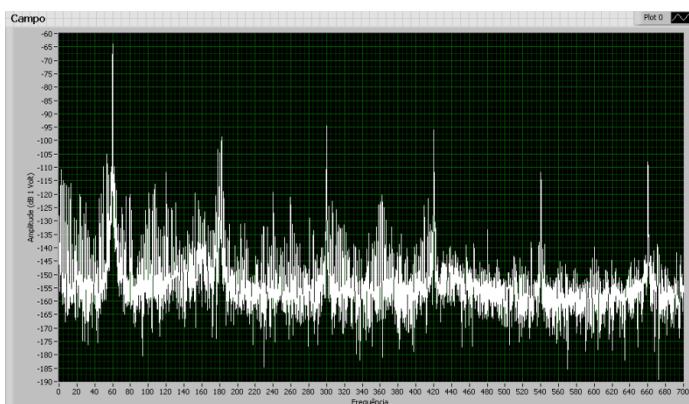
A Figura 62 apresenta o espectro da assinatura magnética até 3.000 Hz. Constata-se, por este resultado, que as componentes mecânicas do gerador acima de 1 kHz permanecem abaixo de -130 dB. Como elas possuem amplitudes próximas ao ruído de fundo, e por serem frequências harmônicas de ordem elevada, são mais suscetíveis a variações aleatórias de medição de amplitude e a variações de velocidade rotórica (por exemplo, para a frequência teórica de 1.071,43 Hz, uma aumento de velocidade rotórica de 1 rpm, resulta em uma variação de 8,34 Hz, ou seja, essa componente harmônica será de 1.079,77 Hz).

**Figura 62: Assinatura magnética até 3000 Hz.**



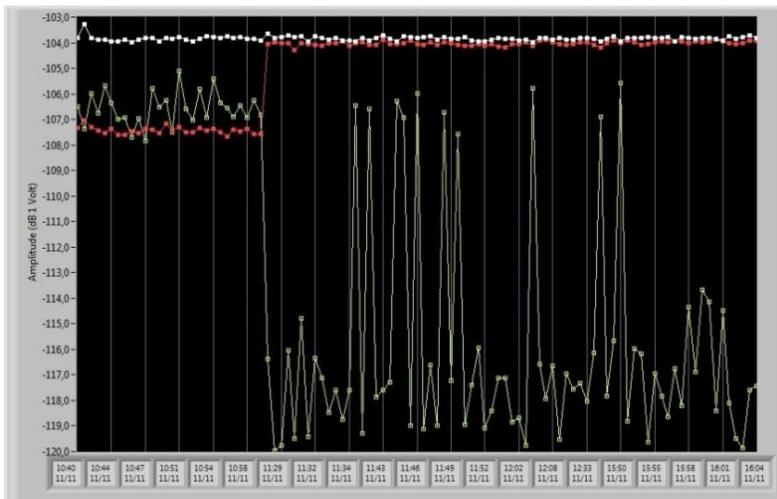
Para a unidade de monitoramento instalada do lado externo ao *housing* do gerador, a FFT do sinal de campo magnético (Figura 63) mostra um espectro menos rico de informações se comparado ao lado interno do *housing* apresentadas na Figura 61 e Figura 62. Acima dos 420 Hz praticamente todas as harmônicas da fundamental mecânica com exceção das harmônicas elétricas ficam abaixo dos -130 dB V.

**Figura 63: FFT do sinal de campo magnético do lado externo do *housing* do gerador.**



A Figura 64 apresenta uma alteração do ponto de operação da máquina que aconteceu às 11h29min de 11 de novembro de 2015. O equipamento detectou automaticamente esta variação. Verificou-se que a 200ª harmônica mecânica (428,57 Hz) da assinatura magnética, curva na cor amarela, teve uma alteração significativa, diminuindo em cerca de 10 dBV. A 2ª harmônica mecânica (4,28 Hz) de frequência, curva na cor vermelha, aumentou em cerca de 3 dBV.

**Figura 64: Alteração capturada por volta das 11h29min de 11/11/2015**

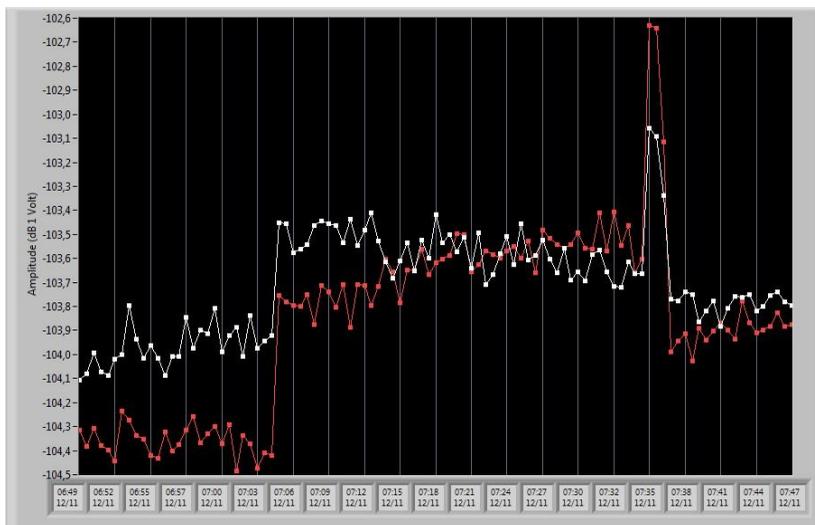


A 200ª harmônica mecânica (428,57 Hz) da assinatura magnética, curva na cor amarela (Figura 64), por possuir uma amplitude relativamente mais baixa (na ordem do ruído), faz com que o rastreamento se perca de vez em quando.

A Figura 65 apresenta uma alteração na assinatura magnética capturada às 7horas e 6 minutos de 12 de novembro de 2015. Neste caso, pode-se verificar a alteração tanto da fundamental mecânica quando da 2ª harmônica mecânica (4,28 Hz) da assinatura magnética. Uma análise nas demais componentes harmônicas do espectro também foi efetuada, mas não apresentadas aqui. Notou-se que várias

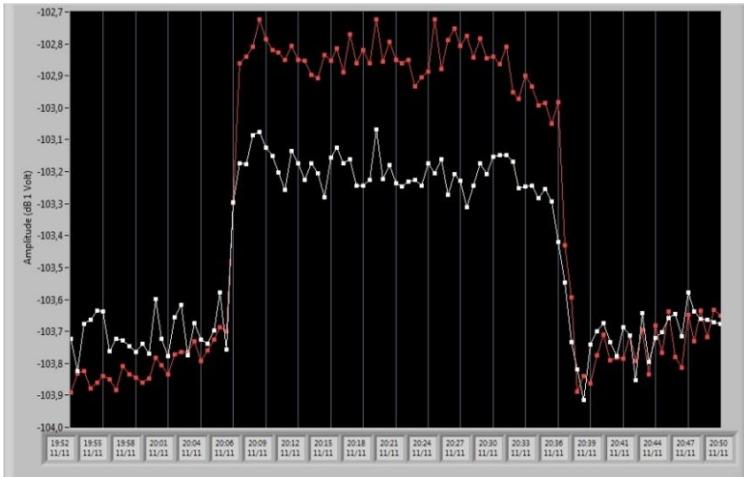
componentes também alteraram sua amplitude. Sabe-se na ocasião que a excitação da máquina foi alterada.

**Figura 65: Alteração capturada por volta das 7h06min de 12/11/2015 e outro evento por volta de 7h35min do mesmo dia (fundamental mecânica na cor branca, 4,28 Hz na cor vermelha).**



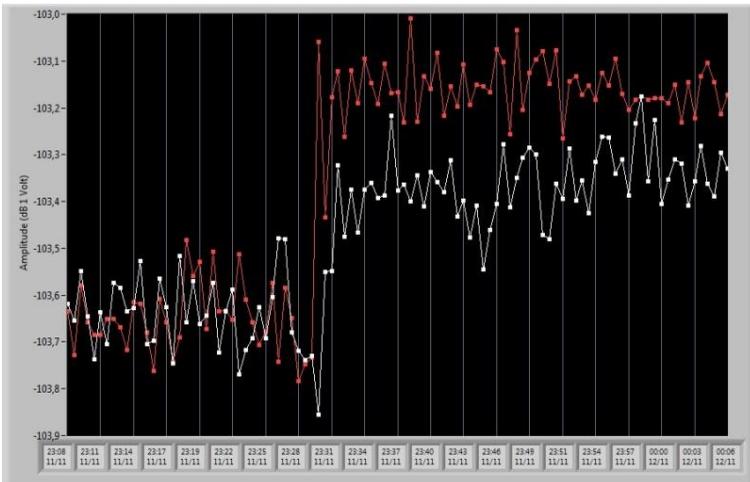
A Figura 66 apresenta um evento de 20 minutos (entre as 20h06min e 20h36min do dia 11 de novembro de 2015). Houve uma alteração da corrente de excitação do gerador.

**Figura 66: Alteração capturada por volta das 20h06min de 11/11/2015 até 20h36min do mesmo dia (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho).**

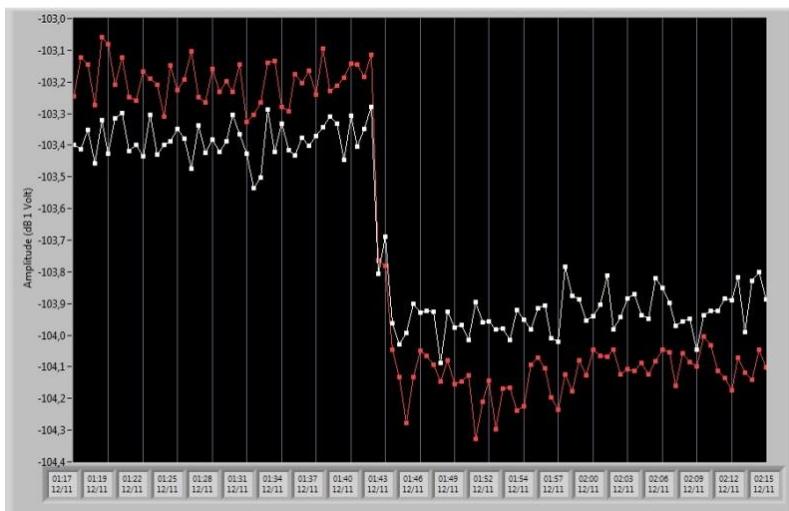


As Figura 67 e Figura 68 apresentam um evento de alteração de aproximadamente 2 horas e 10 minutos.

**Figura 67: Evento capturado por volta das 23h31min de 11/11/2015 (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho).**



**Figura 68:** Evento capturado as 23h31min do dia 11/11/2015 foi até cerca 1h43min do dia seguinte (fundamental mecânica – branco, 4,28 Hz – vermelho).

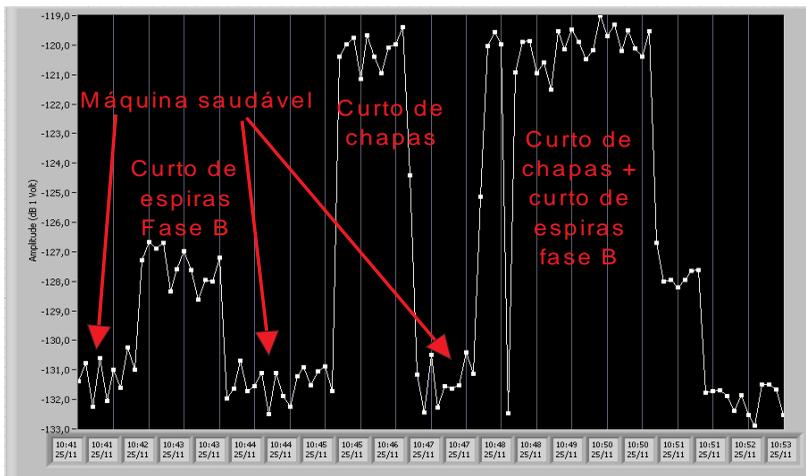


## 7.4 Ensaio do equipamento em bancada

A seguir, são apresentados alguns testes do equipamento em uma bancada contendo um gerador de 8 polos onde é possível impor falhas controladas. A Figura 70 apresenta um gráfico onde foi imposta uma falha de curto em chapas de estator. Esta componente de frequência é de 862,5 Hz (componente de espectro mais sensibilizada pela falha) e no gráfico percebe-se um aumento de 8 dBV quando imposta a falha, indicando uma boa sensibilidade. A unidade foi posicionada de forma a orientar a bobina sonda com eixo tangencial a carcaça do gerador (Figura 69).



Figura 71: Curto de chapas e de espiras da fase B (862,5 Hz).



## 7.5 Considerações finais do capítulo

Apresentaram-se neste capítulo alguns resultados de medições com o equipamento desenvolvido. Estes resultados mostram que o equipamento desenvolvido é apto para detectar variações no espectro de frequência da máquina. Porém, foi inviável até o momento testá-lo sob o aspecto da detecção de defeitos quando instalado na usina (pois não se pode inserir propositalmente defeitos no gerador). Assim, realizou-se também alguns ensaios em laboratório, provocando defeitos em um gerador síncrono de 8 polos.

O algoritmo desenvolvido para rastrear a fundamental mecânica, e consequentemente a velocidade rotórica, se mostrou eficaz. Os resultados mostram que o erro de rastreamento permaneceu menor que 0,01 Hz. Para a máquina hidráulica onde foi instalado o primeiro equipamento fixo, o valor do erro em rpm manteve-se abaixo de 0,5 %. A rotação nominal desta máquina é de 128,57 rpm e para esta máquina, o código está rastreando a velocidade rotórica com erro máximo de 0,56 rpm.

Verificou-se uma boa robustez do código para detecção das harmônicas de interesse. Até a faixa de 1 kHz onde as amplitudes das

componentes de interesse são expressivas, o código detecta satisfatoriamente as amplitudes.

Os espectros obtidos com o equipamento instalado na usina mostram que o equipamento é sensível. Em teste em laboratório, ele se mostrou apto para detectar defeitos.

## 8. Conclusões e Perspectivas

O trabalho de pesquisa atingiu o seu objetivo com o desenvolvimento, implementação e instalação de um equipamento para monitorar geradores síncronos em usinas de energia elétrica através do campo magnético externo. Com ele, é possível obter informações a respeito do funcionamento da máquina através da análise de variações em sua assinatura magnética. Os resultados obtidos mostram a qualidade do equipamento implementado.

O presente desenvolvimento se baseou em trabalhos de pós-graduação desenvolvidos no grupo [1,43]. Porém, aprofundou principalmente na implementação de aspectos de hardware. O desenvolvimento do software de análise de variações do espectro teve grande contribuição de [43].

Não é possível fazer uma análise do equipamento desenvolvido em medições dos geradores das usinas, pois não é viável inserir ou provocar defeitos nas máquinas. Assim, apresentou-se alguns resultados de análise de defeitos incipientes provocados propositalmente em uma bancada de laboratório. O equipamento desenvolvido detectou quando se inseriu defeitos propositalmente.

O equipamento obteve sucesso em suas medições de campo e atualmente está instalado na usina em regime contínuo e ininterrupto.

O sistema série de instalação das unidades de monitoramento por um lado torna a instalação do equipamento mais fácil, já que não há a necessidade de passar vários cabos de fibra óptica por eletrodutos, mas por outro lado torna as unidades de monitoramento dependentes do funcionamento uma da outra. Se uma unidade de monitoramento em série falhar, as unidades posteriores no ramo param também de se comunicar com a central de processamento. Este sistema pode ser melhorado para tornar o sistema série de unidades de forma independente, ou seja, mesmo que uma unidade falhe, as unidades subsequentes não irão parar de funcionar.

Sob o aspecto do *software*, existem pontos que se pode aperfeiçoar, tal como o desempenho no salvamento de arquivos. Como o programa deve acessar frequentemente o HD externo para armazenamento, e sabendo-se que o acesso a um HD USB é mais lento do que o HD interno e muito mais lento do que o acesso à memória RAM, pode-se estudar a possibilidade de armazenamento em blocos de

arquivos ou ainda a possibilidade da criação de um programa independente do principal, responsável apenas para executar esta função.

Verificou-se também, como visto no item 7 deste trabalho, para o equipamento instalado na usina, que a medição de campos magnéticos pelo lado externo do *housing* (compartimento do gerador) do gerador fornece uma assinatura magnética menos rica do que do lado interno. As componentes de alta frequência (acima de 300 Hz) são atenuadas pela parede do *housing*. Visto que algumas faltas em máquinas só podem ser visualizadas pelo comportamento destas componentes acima da fundamental elétrica, as unidades de monitoramento não podem ser instaladas, a princípio, do lado externo a parede do *housing*.

Espera-se com a operação deste equipamento em campo levantar um banco de dados de assinatura magnética que possa contribuir nos estudos da influência dos pontos de operação e da análise de faltas em geradores síncronos, isto é, como o campo magnético externo da máquina é perturbado.

A monitoração de máquinas síncronas de grande porte e de grande valor agregado ainda carece de sistemas com alta taxa de confiabilidade em seus diagnósticos. A proposta de monitoração do campo magnético externo destas máquinas vem atender diferentes tipos de máquinas com diferentes portes. A monitoração do campo magnético externo de máquinas síncronas é uma ferramenta que está com seu desenvolvimento ainda em seus estágios iniciais. Entretanto, os resultados obtidos comprovam que a ferramenta é promissora para ser aplicada na detecção de faltas em geradores síncronos de qualquer potência.

Os pontos que não foram estudados neste trabalho, e ainda são atualmente ligados a novidades/originalidades, são: i) os efeitos de excitação na variação das amplitudes das componentes do espectro de frequência; ii) o comportamento do campo externo com diferentes pontos de operação quando a máquina está sincronizada; iii) a máquina operando sob carga nominal em laboratório; iv) outros estudos teóricos e práticos sobre os estados operacionais da máquina, levantando as razões das alterações de amplitudes ou surgimento de raias em frequências elevadas (acima da fundamental elétrica); v) utilizar os dados de medições da unidade geradora em que o equipamento foi instalado para investigar, desenvolver e complementar programas com

inteligência artificial a serem instalados em futuras versões do equipamento. Esta possibilidade de haver um laboratório em campo é significativa em termos de desenvolvimentos, tanto teórico quanto experimental. Não se conhece trabalhos sobre a detecção de faltas, mesmo de maneira invasiva, publicados na literatura para geradores sincronizados na rede, ainda mais com variações de excitação, do tipo de carga e de estados de operação. Algo também que pode ser investigado é a máquina sob transitórios tratando a detecção de faltas.

Há certas dificuldades para compreender com clareza as alterações nas assinaturas magnéticas (espectros de frequências) devidas aos vários tipos de defeitos que a máquina possa ter, bem como diferenciá-los entre si e de pontos distintos de operação da máquina. Assim, o desenvolvimento de ferramentas de inteligência artificial para que o diagnóstico tenha um alto grau de acerto na detecção de faltas é um tema sugerido para a continuidade deste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Mauricio, Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo, 2014, Tese de doutorado.
- [2] R. Mauricio et al., "Sistema e método para identificar características de uma máquina elétrica," Patente número: "BR 10 2015 011438 9", 2015.
- [3] D. Howe and P. Hammond , "Examination of the axial flux in stator cores with particular reference to turbogenerators," vol. 121, 1974.
- [4] P. Tavner , P. Hammond , and J. Penman , "Contribution to the study of leakage fields at the ends of rotating electrical machines," vol. 125, 1978.
- [5] M. Kiani , W. J. Lee , R. Kenarangui , and B. Fahimi , "Detection of rotor faults in synchronous generators," in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED*, 2007.
- [6] B. A. T. Yamamura, "Contribuição à detecção de defeitos nos rotores de turboalternadores", Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [7] V. P. Bui , "Diagnostic des machines electriques par l'analyse du champ magnetique de fuite application a l'identification de defauts rotoriques d'un alternateur a vide", Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [8] P. Neti and S. Nandi , "Stator interturn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, p. no. 3, 2009.

- [9] P. Neti , A. B. Dehkordi , and A. M. Gole , "A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton*, 2008.
- [10] D. R. Albright. (2012) "Generator field winding shorted turn detection technology". [Online]. [Disponível em http://www.generatorotech.com/](http://www.generatorotech.com/)
- [11] C. M. Pezzani , J. M. Bossio , A. M. Castellino , G. R. Bossio , and C. H. De Angelo , "Bearing Fault Detection in Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, October 2014.
- [12] Xiang Gong and Wei Qiao , "Bearing Fault Diagnosis for Direct-Drive Wind Turbines via Current-Demodulated Signals," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, p. no. 8, August 2014.
- [13] D. Thailly, R. Romary, J.-P. Lecointe, and J.-F. Brudn, "Synchronous machine diagnosis using an external magnetic flux sensor," *International Conference on Electrical Machines- ICEM, Chania*, 2009.
- [14] WEG. (Acessado em agosto de 2015) DT-5 - Características e Especificações de Geradores. [Online]. <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>
- [15] M. Savaghebi, and A. Vahedi H. Hooshyar, "Synchronous Generator: Past, Present and future," *IEEE Internacional Conference on Electrical Machines, AFRICON*, October 2007.
- [16] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. New York, US: McGraw-Hill, 2005.
- [17] National Instruments. (Acessado em novembro de 2015) CompactRIO. [Online]. <http://www.ni.com/compactrio/pt/>

- [18] National Instruments. (Acessado em Agosto de 2015) LabVIEW. [Online]. <http://www.ni.com/labview/pt/>
- [19] Microchip. (Acessado em julho de 2015) PIC18F4525 I/P. [Online]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39626e.pdf>
- [20] G. Stone, M. Sasic, J. Stein, and C. Stinson, "Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE.*, June, 2012.
- [21] A. Anderson. (Acessado em dezembro de 2015) "A note on generator core failures". [Online]. <http://www.antony-anderson.com/failure1.htm>
- [22] J. Wood and R. Hindmarch, "Rotor winding short detection," *IEEE Proceedings*, vol. 133, p. no. 3, 1986.
- [23] D. R. Albright, "Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 90, p. no. 2, 1971.
- [24] M. Sasic, S. Campbell, and B. Lloyd, "Flux monitoring improvement," *IEEE Industry Applications Magazine*, September, 2011.
- [25] W. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors-past, present and future," *Second IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers - SDEMPED*, vol. 99, 1999.
- [26] VibroSystM. (Acessado em fevereiro de 2016) "Hidreletrica - soluções completas de monitoramento". [Online]. <http://vibrosystem.com/pt-br/energia/hidreletrica-solucoes-completas-de-monitoramento/>
- [27] Iris Power. (Acessado em janeiro de 2016) "Motor Hidro online monitoring". [Online]. [http://www.irispower.com/motor\\_cm\\_FluxTracII-S.aspx](http://www.irispower.com/motor_cm_FluxTracII-S.aspx)

- [28] H. F. dos Santos et al., "Desenvolvimento de um Sensor de Campo Magnético por Indução para Medições de Campo em 3D," *Momag*, pp. 590-595, 2014.
- [29] BASTOS, João P. A. , "*Eletromagnetismo para Engenharia estática e quase estática*", 3rd ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012.
- [30] Mauricio Rigoni, Desenvolvimento e aplicações de sensores de campo magnético por indução, 2009, Florianópolis, Dissertação de Mestrado.
- [31] S. Tumanski, *Principles of Electrical Measurements*. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- [32] Honeywell. (Acessado em agosto de 2015) HMC1051 - Datasheet. [Online]. [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/HMC\\_1051-1052-1053\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC_1051-1052-1053_Data_Sheet.pdf)
- [33] Honeywell. (Acessado em outubro de 2015) HMC5883L - Datasheet. [Online]. [https://www.adafruit.com/datasheets/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](https://www.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf)
- [34] Analog Devices. (Acessado em julho de 2015) ADG1611 - Datasheet. [Online]. [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADG1611\\_1612\\_1613.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADG1611_1612_1613.pdf)
- [35] Texas Instruments. (Acessado em janeiro de 2015) INA118U - Datasheet. [Online]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina118.pdf>
- [36] Analog Devices. (Acessado em maio de 2015) OP1177 - Datasheet. [Online]. [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/OP1177\\_2177\\_4177.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/OP1177_2177_4177.pdf)
- [37] Texas Instruments. (Acessado em outubro de 2015) OPA1632 - Datasheet. [Online]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1632.pdf>

- [38] Sidnei Noceti Filho, *Filtros Seletores de Sinais*. Florianópolis: UFSC, 2010.
- [39] Mauricio Rigoni et al., "Aparelho de Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo," in *Citenel - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Costa do Sauípe - Bahia, 2015.
- [40] Texas Instruments. (Acessado em novembro de 2015) ADS8317 - Datasheet. [Online]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8317.pdf>
- [41] Geir Drange. (2004, July) SPDIF Especification. [Online]. [Disponível em http://read.pudn.com/downloads114/sourcecode/others/476536/doc/spdif.pdf](http://read.pudn.com/downloads114/sourcecode/others/476536/doc/spdif.pdf)
- [42] Nelson Sadowski, Helton F. dos Santos, Nelson Jhoe Batistela, and João P. A. Bastos, "Synchronous Generator Fault Investigation by Experimental and Finite Element Procedures.," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015.
- [43] Conrado S. P. Gameiro, Desenvolvimento de metodologia para detecção automática de falhas em máquinas elétricas, Florianópolis, 2015, Dissertação de Mestrado.



