

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS UFSC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

Leandro Vicentini Carril

**INVESTIGAÇÃO DO EMPREGO DA BOBINA DE ROGOWSKI NA MEDIÇÃO DE
CORRENTE DE NEUTRO DE GERADORES SÍNCRONOS**

Florianópolis

2020

Leandro Vicentini Carril

**INVESTIGAÇÃO DO EMPREGO DA BOBINA DE ROGOWSKI NA MEDIÇÃO DE
CORRENTE DE NEUTRO DE GERADORES SÍNCRONOS**

Trabalho Conclusão do Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr..
Coorientador: Eng. Eletric. Helton Fernando dos Santos, MSc.

Florianópolis

2020

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

Carril, Leandro Vicentini

Investigação do emprego da bobina de rogowski na medição de corrente de neutro de geradores síncronos / Leandro Vicentini Carril ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Helton Fernando dos Santos, 2020.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

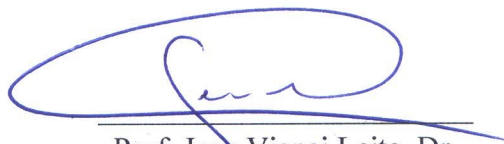
1. Engenharia Elétrica. 2. Manutenção Preditiva. 3. Gerador Síncrono. 4. Bobina de Rogowski. I. Jhoe Batistela, Nelson. II. Fernando dos Santos, Helton. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Leandro Vicentini Carril

Investigação do emprego da bobina de Rogowski na medição de corrente de neutro de geradores síncronos

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

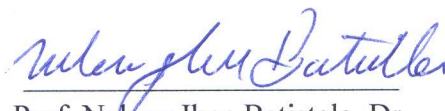
Florianópolis, 23 de janeiro de 2020.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

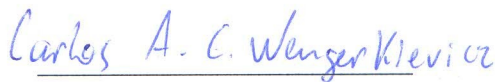
Banca Examinadora:



Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Eletric. Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, MSc.

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Eletric. Celso Luis de Souza, MSc.

AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família por estar sempre presente e me acolherem mesmo nos momentos difíceis.

Aos amigos que fiz no curso, pelo companheirismo ao longo da graduação.

Aos amigos que fiz na faculdade, por todos os bons momentos vividos.

Aos amigos do LAESP, por todo o aprendizado, e principalmente Carlos, Cristian, Danilo, Helton e Luís pela ajuda neste trabalho.

Ao meu coorientador Helton pelas sugestões e instruções deste trabalho.

Ao professor Nelson Jhoe, pela orientação deste trabalho.

À banca examinadora, pela avaliação deste trabalho.

Ao Brasil, por me fornecer uma educação de qualidade gratuita.

RESUMO

Devido à importância da energia elétrica, uma interrupção no seu fornecimento pode causar grandes incômodos para a sociedade. Como os geradores síncronos geram quase toda a energia elétrica consumida no Brasil atualmente, é essencial que estejam disponíveis para o sistema o máximo de tempo possível. A manutenção preditiva visa interferir em um equipamento somente quando necessário, otimizando a disponibilidade do equipamento e gastos com manutenção. Neste contexto, o Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos, GRUCAD, está desenvolvendo uma metodologia de manutenção preditiva em geradores síncronos. Tal metodologia consiste resumidamente em monitorar o campo magnético externo da máquina de maneira não-invasiva. O presente trabalho busca investigar se é conveniente complementar tal abordagem, acrescentando o monitoramento da corrente de neutro utilizando um sensor de corrente do tipo bobina de Rogowski. Foram feitos ensaios em uma bancada especial que possibilita a imposição controlada de vários tipos de faltas. Foi analisado como essas faltas se manifestam no espectro de frequências da corrente de neutro. Por fim, foram analisados dados de uma bobina de Rogowski instalada no neutro de uma unidade geradora de uma usina hidrelétrica.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. Gerador Síncrono. Bobina de Rogowski.

ABSTRACT

Due to the importance of the electrical energy, an interruption in the supply may cause major problems to society. Since the synchronous generators supply almost all electrical energy consumed in Brazil, it's essential that they are available to the system as much as possible. Predictive maintenance aims to interfere in equipment only when necessary, optimizing equipment availability and maintenance expenses. In this context, the research laboratory GRUCAD, is developing a methodology of predictive maintenance for synchronous generators. This methodology consists briefly in monitoring the external magnetic field of the machine in a non-invasive manner. This work seeks to investigate if it is convenient to complement this approach, incrementing the neutral current measurement using a Rogowski coil transducer. Bench tests were performed in a special workbench that allows to simulate many types of faults. It was analyzed how these faults influence in the neutral current frequency spectrum. At last, an analysis was carried out on acquisitions of a Rogowski coil installed in the neutral wire of a generating unit in a hydroelectric power plant.

Keywords: Predictive Maintenance. Synchronous Generator. Rogowski Coil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Vista de um gerador síncrono	22
Figura 2 - Curva de Capabilidade.....	24
Figura 3- Amplitude dos fluxos dos polos para a) Rotor saudável e b) Rotor com os polos 8 e 48 com defeito	25
Figura 4 - Sinal de tensão induzido	27
Figura 5 - Campo criado por um fio condutor.....	29
Figura 6 - Bobina de Rogowski	30
Figura 7 - Bobina de Rogowski utilizada	33
Figura 8 - Regressão linear	34
Figura 9- Bancada de simulação de defeitos em máquina síncronas	36
Figura 10 - Esquema para simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator	38
Figura 11 - Bobinagem de campo do gerador síncrono de 8 polos	39
Figura 12 - Bobinagem de armadura do gerador síncrono de 8 polos	40
Figura 13 - Maleta responsável pelo condicionamento dos sinais do sensor (direita) e analisador de energia (esquerda)	42
Figura 14 - Harmônicas que aumentaram na presença da falta	45
Figura 15- Harmônicas que diminuíram na presença da falta	46
Figura 16- Harmônicas que aumentaram na presença da falta	46
Figura 17– 405 Hz, 450 Hz, 465 Hz e 555 Hz no ponto de operação 2	47
Figura 18- Harmônicas que aumentaram na presença da falta	48
Figura 19– 450 Hz, 465 Hz, 495 Hz e 510 Hz	48
Figura 20- Harmônicas acima de 1000 Hz	49
Figura 21- Fundamental elétrica e suas vizinhas sensibilizadas	50
Figura 22- Harmônicas acima de 1000 Hz	50
Figura 23 - 69 ^o , 74 ^a , 75 ^a e 78 ^a harmônicas da fundamental mecânica no ponto de operação 1	51
Figura 24 - 69 ^o , 74 ^a , 75 ^a e 78 ^a harmônicas da fundamental mecânica no ponto de operação 2	52
Figura 25 - 150 Hz, 270 Hz e 330 Hz	52
Figura 26- a) bobina de Rogowski, b) e c) sensores de campo por indução	54
Figura 27 - Harmonicas sensibilizadas obtidas pelo sensor de campo por indução ..	55

Figura 28 – Assinatura magnética	57
Figura 29 – Detalhe do espectro	57
Figura 30 – Histórico da fundamental mecânica	58
Figura 31 – Fundamental mecânica com filtro digital	59
Figura 32 - Fundamental elétrica (60 Hz)	59
Figura 33- 31ª harmônica (66,43 Hz)	60
Figura 34 – 141ª harmônica mecânica (302,14 Hz) medida pelos sensores de campo magnético por indução instalados na usina	61
Figura 35 - Terceira harmônica elétrica (180 Hz)	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores adequados	34
Tabela 2 - Parâmetros nominais da bancada	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BR	Bobina de Rogowski
FFT	Fast Fourier Transform
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
GS	Gerador Síncrono
LABMAQ	Laboratório de Máquinas e Acionamento Elétricos
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	MOTIVAÇÃO	18
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.3	ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MÁQUINAS SÍNCRONAS	21
2.1.1	Aspectos Construtivos	21
2.1.2	Princípio de funcionamento	23
2.1.3	Gerador operando conectado	23
2.2	DETECÇÃO DE FALTAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	25
3	BOBINA DE ROGOWSKI	28
3.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
3.2	AVERIGUAÇÃO DA LINEARIDADE E DA SENSIBILIDADE DO SENSOR	32
4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO EM LABORATÓRIO	35
4.1	A BANCADA DE ENSAIOS	35
4.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO	41
4.2.1	Condicionamento do sinal	41
4.2.2	Software utilizado na aquisição	42
5	ENSAIOS EM BANCADA	44
5.1	CURTO-CIRCUITO DE ESPIRAS DO ROTOR	44
5.1.1	Ponto de operação 1	44
5.1.2	Ponto de operação 2	46
5.2	REDUÇÃO NO NÚMERO DE ESPIRAS DE UM POLO DO ESTATOR	47
5.2.1	Ponto de operação 1	47
5.2.2	Ponto de operação 2	49
5.3	CURTO-CIRCUITO DE ESPIRAS DO ESTATOR	51
5.3.1	Ponto de operação 1	51

5.3.2	Ponto de operação 2	51
5.4	CURTO-CIRCUITO DE CHAPAS DO ESTATOR	53
5.5	COMPARAÇÃO COM SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO	53
6	ANÁLISE DE DADOS OBTIDOS EM GERADOR DE USINA	56
6.1	DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO INSTALADO	56
6.2	RESULTADOS DA ANÁLISE	56
7	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a energia elétrica é uma das principais fontes para geração artificial de luz, calor e força. Os aparelhos elétricos e eletrônicos, presentes em nossas vidas, necessitam dela para funcionar. Dada à importância da energia elétrica, qualquer interrupção no seu fornecimento pode causar grandes incômodos e prejuízos para a população.

Em nossos dias, as máquinas responsáveis pela maior parte da geração de energia elétrica no Brasil e no mundo são Geradores Síncronos (GS). Os estudos sobre esta máquina estão consolidados no que se refere à sua função principal, isto é, a conversão de energia mecânica em elétrica. Contudo, a manutenção preditiva de geradores síncronos ainda é uma área aberta para a pesquisa e para aplicação industrial.

Existem três tipos principais de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva. A corretiva consiste em reparar o equipamento após a avaria. Isso faz com que as paradas de manutenção sejam em momentos aleatórios e talvez inoportunos. A manutenção preventiva trata de um trabalho de prevenção de que ocorram defeitos inesperados que possam resultar em parada ou em operação com baixo rendimento. Ela diminui os gastos com a manutenção corretiva e, geralmente, é feita com uma periodicidade de tempo fixa. Já a manutenção preditiva tem como objetivo deixar os equipamentos operando o máximo de tempo possível e só interferir no momento necessário, que é estimado com base no monitoramento da condição.

O monitoramento da condição é o processo para determinar as condições da máquina em operação através da medição e análise do comportamento de grandezas como vibração, corrente elétrica, temperatura e campo magnético (TAVNER, 2008). Seu principal objetivo é detectar faltas incipientes, isto é, defeitos em estágio inicial. Busca possibilitar a avaliação do intervalo de tempo até que o defeito possa se tornar crítico. Assim, equipes de manutenção têm mais tempo para se preparar e a intervenção corretiva passa a ser realizada em um período estratégico.

Cabe ressaltar que sistemas de proteção que monitoram variáveis como correntes, tensões, vibrações são essenciais para evitar ou minimizar falhas catastróficas. Porém, conforme TAVNER (2008), a proteção geralmente é programada para atuar quando a falha já ocorreu. Para evitar tais acontecimentos, há pesquisas científicas e desenvolvimentos de equipamentos que buscam implementar metodologias capazes de detectar faltas incipientes.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), instituição onde este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi desenvolvido, possui projetos de pesquisa concluídos e em andamento que buscam explorar metodologias de detecção de faltas incipientes, como por

exemplo, as referências (RIGONI, 2014), (DOS SANTOS, 2016) e (DOS SANTOS, 2017). Estes trabalhos realizam o monitoramento de alteração de amplitudes de harmônicas do campo magnético externo de GSs, e fazem testes em uma bancada (vide capítulo 4) que permite a imposição controlada de alguns tipos de falta. O presente trabalho faz uso desta bancada para obter resultados experimentais sobre a possibilidade de obter alguma informação relevante sobre a condição da máquina, só que monitorando a corrente de neutro do GS com uma bobina de Rogowski – BR (descrita no capítulo 3), e empregando técnicas de análise presentes na literatura. Além disso, a metodologia é aplicada em uma situação real. Uma das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Itá contém uma BR para medição de formas de onda da derivada da corrente de neutro. Uma análise de dados obtidos em um GS da usina será abordada.

Este TCC foi motivado e parcialmente custeado pelos projetos regulados pela ANEEL e desenvolvidos no âmbito do Programa de P&D da ENGIE Brasil Energia, PD-0403-0033/2012 e PD-00403-0048/2019, sendo um resultado destes projetos, ambos intitulados “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”. Efetivamente, trata de uma das modalidades de sensoriamento constante no pedido com o número de processo BR 10 2015 011438 9 (INPI) referente à Patente de Invenção "Sistema e Método para Identificar Características de uma Máquina Elétrica”.

1.1 MOTIVAÇÃO

Levando em consideração o fato de que a regulamentação do sistema elétrico tem progressivamente conduzido as concessionárias a um maior compromisso com a manutenção para ofertar alta disponibilidade das unidades geradoras, e de que os geradores de grande porte possuem um custo elevado, a detecção de uma falta em seu estágio inicial pode ajudar a evitar danos severos no ativo de uma empresa e aumentar o grau de confiabilidade do sistema elétrico.

Neste contexto, e levando em conta os trabalhos de pesquisa desenvolvidos no Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, os trabalhos de RIGONI (2014) e DOS SANTOS (2016, 2017) fazem o uso de uma metodologia de monitoramento de harmônicas do campo magnético externo, fora da carcaça da máquina, para detectar faltas incipientes impostas em geradores síncronos.

O foco deste trabalho de conclusão de curso consiste em avaliar a possibilidade de complementar a metodologia de monitoramento de condição da máquina descrita em (DOS SANTOS, 2016), adicionando o sensoriamento da derivada da corrente de neutro com o uso de uma bobina de Rogowski.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O trabalho tem por objetivos investigar e confirmar se a corrente de neutro medida por uma bobina de Rogowski em um gerador síncrono conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) contém informações para a detecção de faltas incipientes.

Os objetivos específicos são:

- Realizar estudo de máquinas síncronas;
- Estudar metodologias para detecção de faltas em máquinas síncronas;
- Analisar a influência de faltas, impostas de maneira controlada, no espectro harmônico da corrente de neutro através de ensaios em bancada;
- Verificar a metodologia em aplicação em GS de usina.

1.3 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Além da contextualização deste capítulo introdutório, no capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre máquinas síncronas. Uma revisão bibliográfica sobre detecção de faltas em máquinas síncronas também é abordada.

O terceiro capítulo trata exclusivamente do sensor utilizado neste trabalho, isto é, a bobina de Rogowski. É feita a dedução matemática da equação que relaciona a corrente de neutro com o sinal de tensão na saída do transdutor, bem como uma averiguação da linearidade do sensor utilizado nos ensaios.

No capítulo 4 são apresentados a bancada de ensaios em conjunto com os mecanismos que ela possui para a imposição controlada de defeitos e o sistema responsável pelo tratamento dos sinais medidos pelo sensor.

O capítulo 5 trata dos ensaios feitos na bancada. Os resultados obtidos são analisados e discutidos.

No capítulo 6 é feita uma avaliação e análise dos dados provenientes de medições realizadas em um sistema de monitoramento de corrente de neutro instalado em uma unidade geradora na Usina Hidrelétrica Itá.

Finalmente, no capítulo 7, os resultados do TCC são analisados, e sugestões para futuros trabalhos e possíveis melhorias são propostas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados alguns dos conceitos teóricos importantes para o entendimento do trabalho. Primeiramente, será abordada, em um breve resumo, a máquina síncrona. São listados os principais componentes da máquina, descrevendo suas funções. Na sequência, são explicados o princípio de funcionamento das máquinas síncronas e a operação da máquina quando conectada ao sistema.

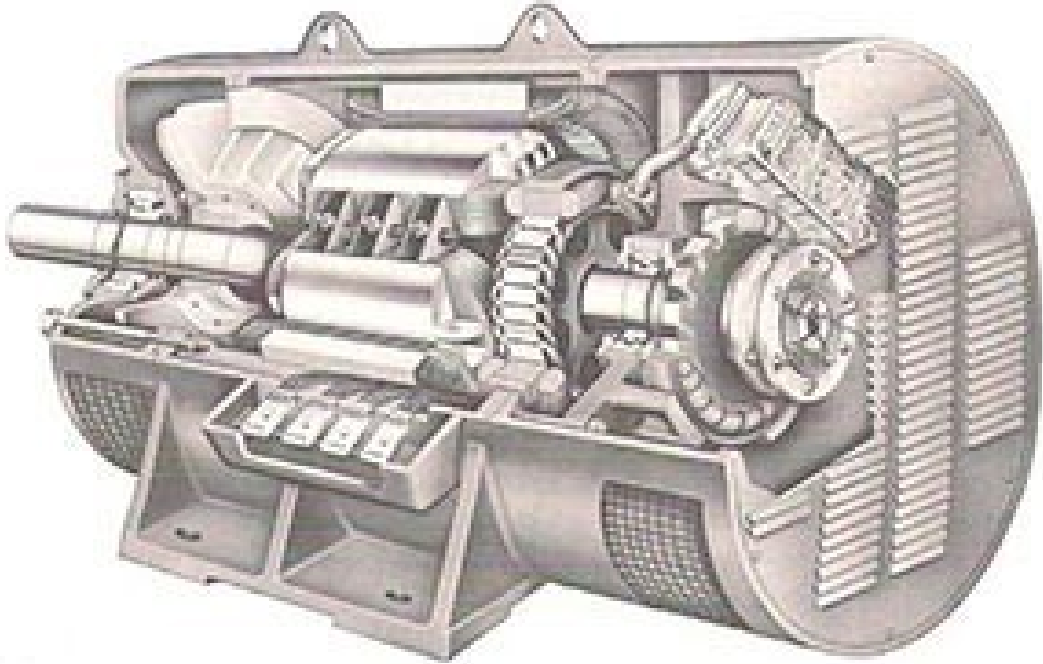
A fim de contextualizar o trabalho, são citados os trabalhos de detecção de faltas em máquinas síncronas que esse TCC tem como referências principais. Por fim, será explicada a parte teórica da metodologia a ser utilizada nesse trabalho.

2.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.1.1 Aspectos Construtivos

Os geradores e os motores síncronos são constituídos basicamente pelo rotor e pelo estator. Geralmente, o estator é feito de chapas de aço empilhadas (pacote do estator) contendo ranhuras para alojar o enrolamento de armadura, e abriga em seu interior o rotor. O rotor é um eixo apoiado na carcaça por mancais, onde está montado o seu núcleo, também ferromagnético, contendo o enrolamento de campo. A ligação elétrica entre a parte móvel e o exterior pode ser feita de várias maneiras, dependendo do sistema de excitação, tais como a utilização de anéis coletores. Um exemplo de gerador síncrono é mostrado na Figura 1.

Figura 1- Vista de um gerador síncrono



Fonte: (HEIER, 1996)

Uma descrição resumida das funções dos principais componentes é feita a seguir:

- Carcaça: responsável pelo suporte mecânico do estator. Normalmente, não é atravessada por um fluxo magnético intenso, atenuando também o fluxo disperso no exterior da máquina.
- Núcleo do estator: tem por função concentrar o fluxo e proporcionar uma indução magnética elevada no entreferro. É feito de material ferromagnético. Como o campo magnético é variável no tempo, deve ser feito de um material com perdas no ferro reduzidas, isto é, com relativa área do ciclo de histerese menor do que materiais de alta perda e resistividade elétrica elevada.
- Enrolamento de armadura: alojado nas ranhuras do núcleo do estator, é um conjunto de três enrolamentos contendo várias bobinas, geralmente de cobre, isoladas.
- Rotor: é a parte rotativa da máquina, e podem ser de polos lisos ou salientes. Nos de polos lisos, os condutores estão inseridos em ranhuras distribuídas ao longo da periferia de um núcleo geralmente maciço. Nos de polos salientes e em máquinas de grande porte, há um núcleo central em que se montam as partes salientes dos polos, onde os condutores são enrolados.
- Anéis e escovas ou sistema *Brushless*: Estas partes são responsáveis por injetar corrente contínua no circuito de campo, regulando a tensão interna do gerador. A

maneira mais simples de fazer a ligação elétrica é utilizando anéis coletores, estruturas montadas no eixo do rotor em contato com escovas que deslizam sobre esses anéis. No sistema *Brushless*, usam-se enrolamentos auxiliares no rotor que se deslocam em um campo magnético, induzindo uma corrente alternada que é retificada e aplicada diretamente no enrolamento de campo.

2.1.2 Princípio de funcionamento

Ao ser alimentado por um sistema trifásico de correntes, o conjunto de bobinas do estator, distanciadas em 120 graus elétricos entre fases, produz um campo magnético girante uniforme dentro do estator.

O gerador síncrono tem seu rotor movimentado por uma máquina motriz. Nesse rotor está alojado um eletroímã, com o mesmo número de polos do campo girante produzido pelos enrolamentos do estator. O campo magnético girante tem a velocidade igual à rotação mecânica. A frequência elétrica (f_e) induzida nos terminais do gerador depende do seu número de polos e da rotação, obedecendo a seguinte equação:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.1)$$

Em (2.1), n_m é a rotação mecânica, em rotações por minuto, e P o número de polos.

Quando o gerador está alimentando uma carga, a tensão terminal da fase da máquina difere da tensão gerada interna, devido aos efeitos da reação de armadura do gerador e também devido às quedas de tensão relacionadas à resistência e à reatância dos enrolamentos de armadura. O campo girante no estator se defasa em relação ao campo girante imposto pelo rotor em função principalmente da carga. Esse ângulo de defasagem é conhecido como ângulo de carga.

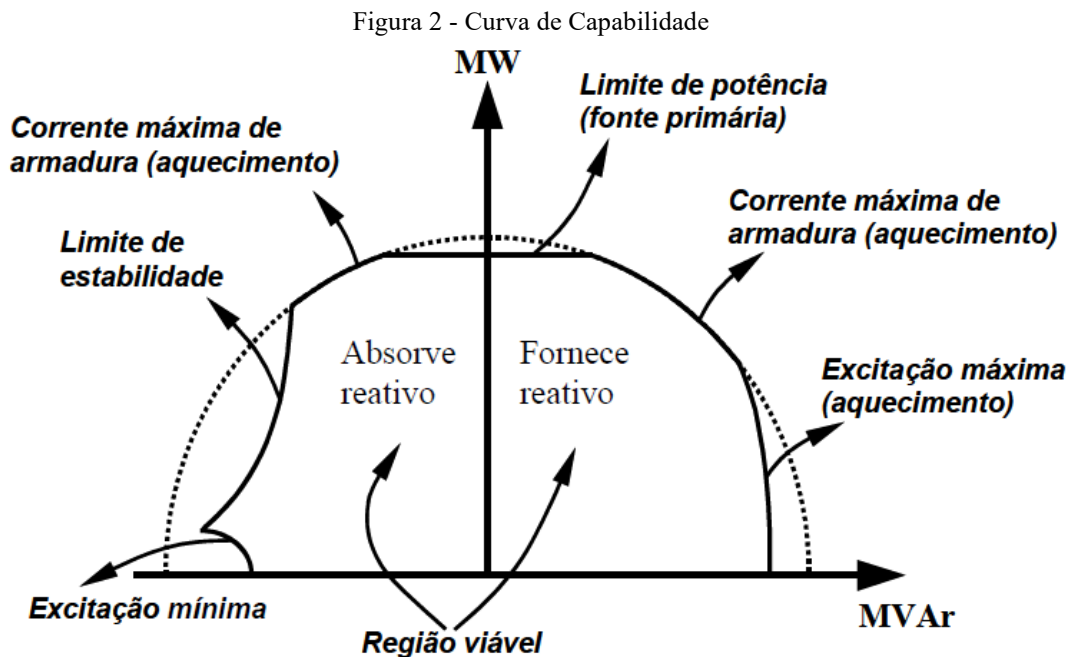
2.1.3 Gerador operando conectado

Geradores síncronos de usinas raramente operam isolados. Normalmente são conectados a uma rede interligada, na qual vários geradores estão operando em paralelo.

Quando um gerador é ligado a um barramento infinito, a frequência e a tensão são fixadas, de modo que o torque imposto pela máquina primária e a corrente de campo controlam o fluxo de potências ativa e reativa, respectivamente, do gerador. Nos sistemas

reais, que contêm geradores de tamanhos aproximadamente iguais em uma usina, uma modificação na potência ativa ou na corrente de campo afeta a frequência e a tensão, respectivamente, no barramento conectado à rede.

O gerador síncrono tem sua capacidade de produção elétrica limitada por algumas restrições, que podem ser resumidas pela sua curva de capacidade, apresentada na Figura 2. Essa curva define a região de operação da máquina: a região de sobre-excitação (fornecendo reativo), que tem restrições de aquecimento e a região de sub-excitação (absorvendo reativo), cujos principais fatores limitantes estão relacionados à perda do sincronismo da máquina com o sistema. Como já mencionado, para aumentar a potência ativa e reativa entregues pela máquina, é necessário aumentar o torque imposto pela máquina primária e a corrente de campo, respectivamente.



Fonte: (RAGNEV, 2005)

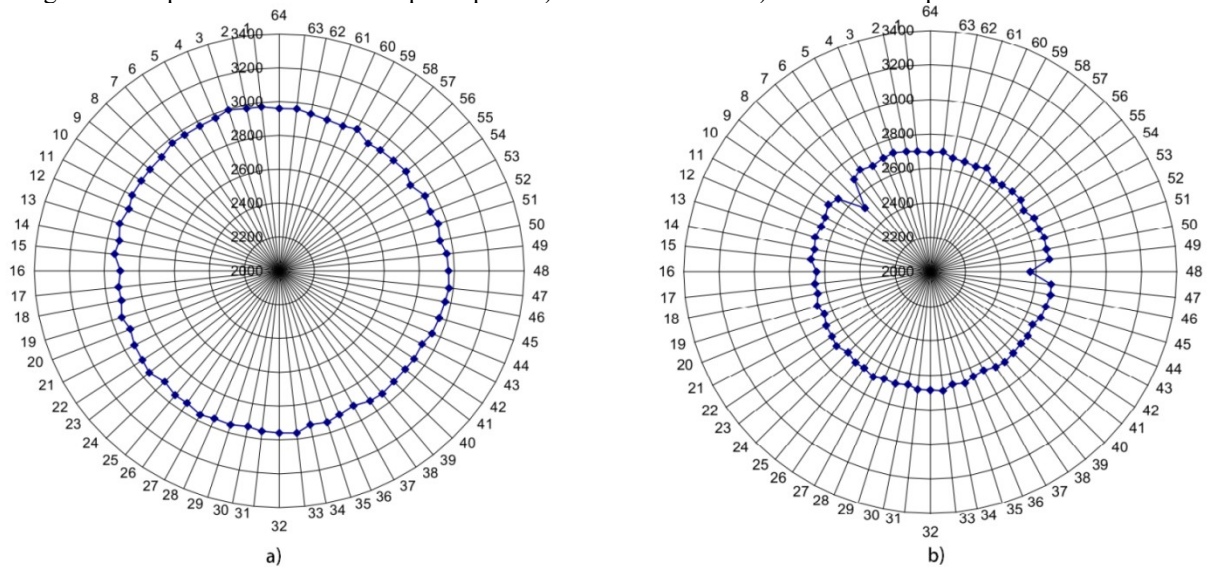
Geralmente, as usinas hidrelétricas estão localizadas longe dos grandes centros de consumo de energia, sendo conectadas através de linhas de transmissão longas, que inserem capacitâncias parasitas no sistema, fornecendo potência reativa para o sistema (SOUSA, 2003). Como o excesso de reativo no sistema faz a tensão aumentar, os hidrogeradores operam sub-excitados (absorvendo reativo).

2.2 DETECÇÃO DE FALTAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

A detecção de faltas em máquinas elétricas é um assunto com grande potencial de desenvolvimento. Várias linhas de pesquisa e desenvolvimento de produtos buscam metodologias que consigam detectar, com precisão, quando uma falta está em evolução. A maioria deles envolve monitorar alguma grandeza que se modifica na ocorrência de um evento incipiente, como por exemplo, temperatura, vibração ou campo magnético. No mercado especializado, é possível encontrar produtos e soluções oferecidos por empresas, principalmente sistemas de monitoramento de vibração. Como este trabalho procura aplicar e analisar uma metodologia desenvolvida no projeto PD-0403-0033/2012, intitulado "Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo", o foco principal será a aplicação de uma técnica com análise da grandeza corrente elétrica. Na realidade, será da forma de onda de sua derivada temporal.

Um sistema comercialmente disponível que envolve o monitoramento do fluxo interno de um gerador síncrono é oferecido pela empresa canadense *Iris Power*. Seu equipamento, o *FluxTracII-S*, requer a instalação de bobinas-sondas na região do entreferro da máquina para monitorar o fluxo magnético produzido por cada um dos polos do rotor (IRIS POWER, 2019). Essa técnica possibilita não só detectar a presença de uma falta incipiente no rotor, como também em qual polo está localizada, como indica a Figura 3.

Figura 3- Amplitude dos fluxos dos polos para a) Rotor saudável e b) Rotor com os polos 8 e 48 com defeito



Fonte: (STONE, 2012)

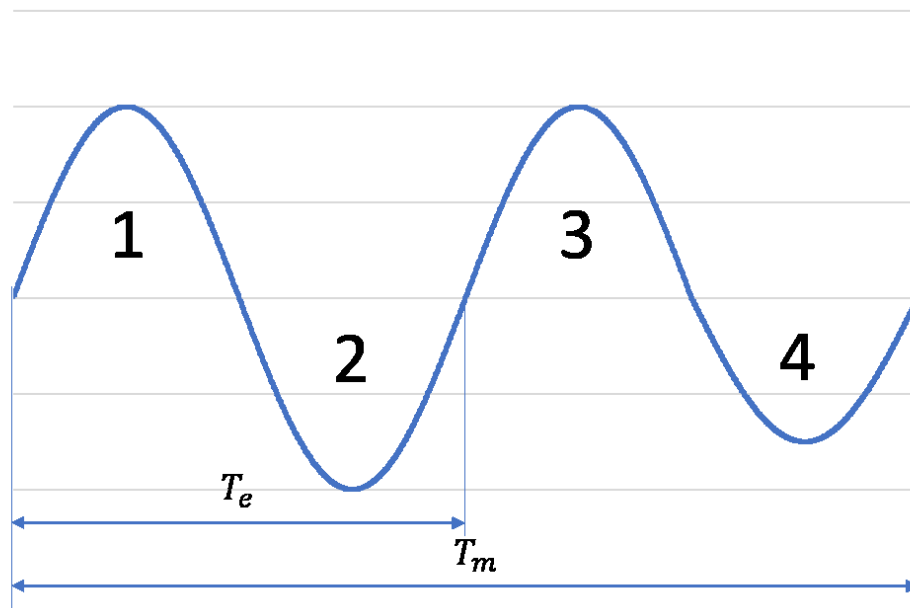
A Figura 3 mostra o monitoramento em tempo real de um gerador de 64 polos, onde no caso a) o rotor está saudável e no caso b) os polos 8 e 48 do rotor tiveram algumas espiras curto-circuitadas, e por isso apresentam uma amplitude menor que o de seus vizinhos.

No meio acadêmico, existem alguns trabalhos de metodologias de detecção de faltas incipientes utilizando o campo magnético externo, sendo a maioria deles voltados para motores de indução. Há também alguns trabalhos que envolvem a assinatura de corrente de máquinas síncronas, principalmente a do enrolamento de campo. Porém a principal referência deste TCC é a metodologia utilizada em (RIGONI, 2014) e (DOS SANTOS, 2016).

Rigoni, em seu trabalho, faz o monitoramento do fluxo magnético disperso, presente no exterior da máquina, com o uso de sensores de campo por indução. Seu objeto de estudo foram as máquinas síncronas. Dos Santos aperfeiçoou a metodologia proposta por Rigoni, e instalou um protótipo em um gerador em uma usina. Tal metodologia consiste basicamente em analisar sinais de tensão do sensor no domínio da frequência em busca de alterações em frequências específicas, isto é, a frequência mecânica e suas harmônicas.

Para elucidar o que é a frequência mecânica, considera-se uma única espira sensora posta em qualquer parte no estator de uma máquina síncrona de quatro polos. Considera-se também que a tensão induzida nessa espira seja puramente senoidal, onde cada polo do rotor induz um semiciclo de uma senoide na espira conforme a máquina gira. Considerando o caso que um dos polos esteja com algum tipo de defeito, e passe a gerar uma amplitude menor do que os demais polos, três desses polos estão sadios gerando uma mesma amplitude. Porém, o polo defeituoso gera com amplitude menor. A forma de onda de tensão induzida na espira pode ser representada como mostrada na Figura 4, onde T_e é o período da fundamental elétrica, dada pela equação (2.1).

Figura 4 - Sinal de tensão induzido



Fonte: autor

Esse sinal de tensão se repete a cada período mecânico (T_m), e isso faz com que a máquina tenha um espectro característico dependente do número de polos. Conseqüentemente, sua primeira harmônica é a fundamental mecânica (f_m), dada pela seguinte equação:

$$f_m = \frac{2f_e}{P} \quad (2.2)$$

Assimetrias de polos estão presentes mesmo em uma máquina considerada sadia devido a não idealidades. A não homogeneidade dos polos e ranhuras, assim como a anisotropia do aço elétrico e imperfeições ocorridas durante o processo de fabricação, já são suficientes para o surgimento da fundamental mecânica e suas harmônicas. Na presença de uma falta, suas amplitudes tendem a se tornarem maiores. Este TCC busca investigar se essas assimetrias geram desbalanços nas correntes e/ou tensões nas fases da máquina, conseqüentemente modificando o conteúdo harmônico da corrente de neutro.

3 BOBINA DE ROGOWSKI

Este capítulo trata exclusivamente do transdutor utilizado no trabalho, isto é a bobina de Rogowski (BR). Inicialmente apresenta-se um enfoque teórico, onde é deduzida, a partir de equações do eletromagnetismo, a expressão que rege o funcionamento do sensor. Também são feitos comentários acerca das equações. Na sequência, aborda-se a averiguação da linearidade realizada no sensor utilizado nos ensaios em bancada.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A bobina de Rogowski (BR) fisicamente é apenas um fio condutor enrolado uniformemente em um tubo, que serve de suporte físico e atua como núcleo. Este tubo geralmente é feito de um material flexível e não ferromagnético, para não saturar e possuir linearidade na faixa de trabalho. Possui extremidades abertas para que se possa envolver o condutor ou peça em que se deseja medir a corrente.

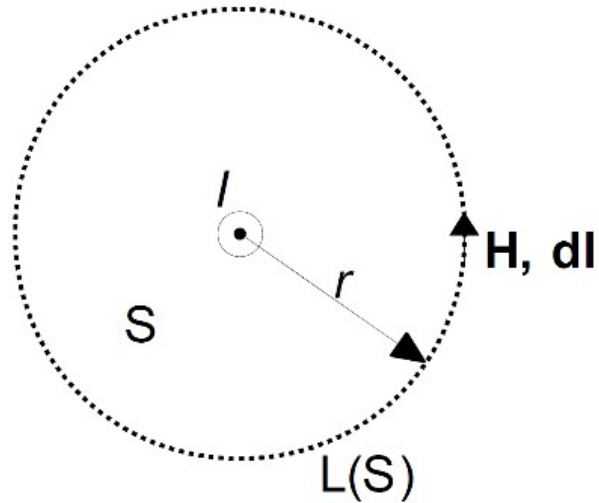
O princípio de funcionamento da BR se baseia em duas leis da física: uma corrente atravessando um condutor cria um campo magnético rotacional em volta dele, respeitando a regra da mão direita, e a variação do campo magnético produz uma diferença de potencial nos terminais de uma espira imersa neste campo.

A primeira lei física citada acima é também conhecida como lei de Ampère. Na sua forma integral é dada pela equação (3.1), onde \mathbf{H} é o campo magnético ao longo de um laço fechado de comprimento L , com elemento infinitesimal $d\mathbf{l}$, e I uma corrente no condutor abraçado pela BR. Por convenção adotada, as variáveis em negrito e itálico são de natureza vetorial e escalar, respectivamente.

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (3.1)$$

A Figura 5 representa uma corrente I em um fio condutor infinito perpendicular e centralizado no plano S . S é uma superfície circular de raio r .

Figura 5 - Campo criado por um fio condutor



Fonte: (BASTOS, 2008)

Aplicando a lei de Ampère ao longo da linha L , que delimita a superfície S , tem-se

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (3.2)$$

Como ao longo de $L(S)$ o campo \mathbf{H} e o vetor infinitesimal $d\mathbf{l}$ são colineares, o produto escalar entre esses vetores é igual ao produto de seus módulos:

$$H \oint_{L(S)} dl = I \quad (3.3)$$

Resolvendo a integral:

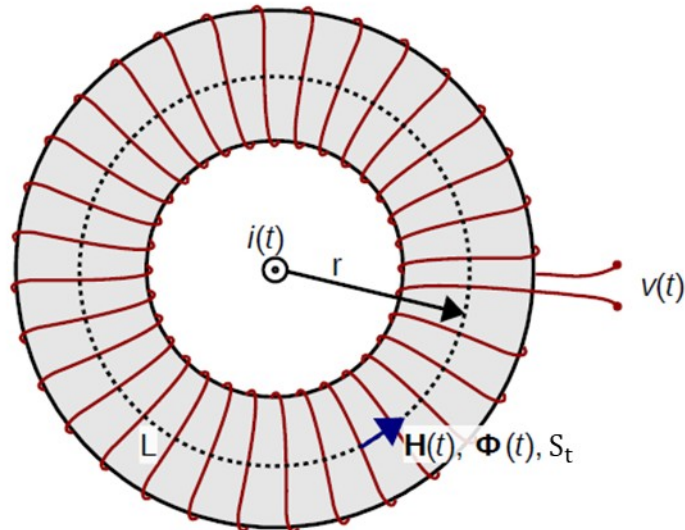
$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (3.4)$$

A segunda lei física que explica o funcionamento do transdutor é a lei de Faraday. Segundo essa lei, se o plano no interior de uma espira de um condutor for atravessado por um fluxo magnético Φ variante no tempo, um potencial elétrico U surge nos terminais da espira. Esse potencial é proporcional à variação (derivada) do fluxo, conforme a equação abaixo:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.5)$$

A figura seguinte mostra um esquema de uma bobina de Rogowski, onde o núcleo é perfeitamente toroidal, de comprimento médio igual a L , com um condutor posicionado no centro do núcleo, tendo uma corrente $i(t)$. A área de secção transversal da espira é S_t .

Figura 6 - Bobina de Rogowski



Fonte: Adaptado de (DOS SANTOS, 2010)

A indução magnética \mathbf{B} é a mesma para todas as espiras, isto é, o mesmo fluxo magnético Φ atravessa todas as espiras enroladas no toróide. Isso implica que todas as espiras produzem a mesma força eletromotriz, dada por:

$$U(t) = -S_t \frac{dB(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Fazendo uso da relação constitutiva $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$, sendo μ a permeabilidade magnética do material, tem-se:

$$U(t) = -S_t\mu \frac{dH(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Com o campo magnético produzido por um condutor a uma distância r , dado pela equação (3.4), tem-se o potencial elétrico em cada espira:

$$U(t) = -\frac{S_t \mu}{2\pi r} \frac{di(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Considerando que no toróide foram bobinadas N espiras e que seu caminho médio é igual a $2\pi r$, a equação (3.8) é dada por (3.9), onde $v(t)$ é a tensão nos terminais da bobina:

$$v(t) = -\frac{NS_t \mu}{L} \frac{di(t)}{dt} \quad (3.9)$$

Essa equação estabelece a relação entre a tensão induzida nos terminais da bobina e a derivada da corrente a ser mensurada $i(t)$. Como a tensão depende da derivada da corrente, o sensor possui a limitação de não ser sensibilizado por correntes contínuas.

Embora essa equação tenha sido obtida para um caso particular de um condutor no centro de uma bobina circular, esse resultado pode ser estendido para qualquer formato que a bobina possa assumir, desde que descreva um caminho fechado em torno do condutor. A explicação formal pode ser encontrada nas referências (BASTOS, 2008) e (OATES, 1991). O resultado também permanece inalterado caso o condutor esteja inclinado (não satisfazendo a condição de perpendicularidade entre a corrente e o plano da bobina).

Na prática, as espiras não estão distribuídas de forma perfeitamente homogênea ao longo do núcleo. Dessa forma, para que as condições de irregularidades geométricas descritas acima não afetem significativamente o sinal de tensão produzido pela bobina, deve-se construir uma BR com as espiras distribuídas de forma mais precisa possível.

O mesmo raciocínio se aplica para rejeição de campos magnéticos externos. Para que a bobina de Rogowski seja sensibilizada exclusivamente pelo campo magnético proveniente dos condutores envolvidos por ela, é necessário distribuir homogeneamente as espiras ao longo do núcleo.

Ao se isolar a corrente $i(t)$ da equação (3.9), tem-se as operações necessárias para calcular a corrente que atravessa o condutor. A integração do sinal de tensão pode ser feita de forma analógica ou digital. Porém, este trabalho não fará esta integração e todas as medições de corrente de neutro serão, na verdade, a tensão induzida na BR. A justificativa para isto é fornecida a seguir.

Considerando que a corrente de neutro $i_n(t)$ pode ser escrita como uma série de senóides e possui valor médio igual à zero, temos que:

$$i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(n\omega_0 t) \quad (3.10)$$

Onde, a_n é a amplitude de cada harmônica da corrente (em ampères), ω_0 é a frequência fundamental (em rad/s), t o tempo (em segundos) e n o índice do somatório.

A derivada da corrente de neutro $i'_n(t)$ é:

$$i'_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n\omega_0 a_n \text{cos}(n\omega_0 t) \quad (3.11)$$

Comparando as equações, percebe-se que a derivada da corrente de neutro possui um termo n que faz com que as harmônicas maiores sejam multiplicadas por um número maior. Logo, a integração da corrente não será feita, pois um integrador é um filtro-passa baixas que atenua a amplitude das altas frequências, que são de interesse desse trabalho.

3.2 AVERIGUAÇÃO DA LINEARIDADE E DA SENSIBILIDADE DO SENSOR

A bobina de Rogowski (Figura 7), utilizada nos ensaios em bancada, foi confeccionada com um tubo de material flexível, não ferromagnético, preenchido com ar. Após ter sido bobinada com um fio de cobre, ela foi revestida com um material elástico para proteger de choques mecânicos que pudessem danificar o fio de cobre.

Figura 7 - Bobina de Rogowski utilizada



Fonte: autor

O foco deste trabalho é verificar as alterações das amplitudes de componentes harmônicas das formas de onda da derivada da corrente de neutro. Embora não se garanta a linearidade em frequência, algo não tão importante no caso da aplicação em detecção de faltas em GS, foi feita uma averiguação da linearidade e estudo da sensibilidade do sensor em 60 Hz variando a intensidade da corrente.

Um painel de lâmpadas incandescentes alimentado por uma fonte monofásica senoidal de 60 Hz foi montado. Através dos interruptores individuais das lâmpadas se modificou a intensidade da corrente no condutor. Para aumentar a intensidade de campo magnético no sensor, o condutor foi envolvido por quatro voltas da BR. Além disso, o condutor também atravessa cinco vezes o interior das voltas da BR, apenas durante este teste de linearidade, para aumentar a amplitude do sinal.

A corrente em valores eficazes no condutor foi mensurada pelo analisador de energia *WT500 Power Analyzer*, da fabricante *Yokogawa*. O sinal de tensão da bobina de Rogowski também é em valores eficazes e corresponde ao valor antes de ser amplificado. Os valores de tensão obtidos foram divididos por cinco, pois nos ensaios em laboratório o condutor neutro só atravessou uma vez as quatro voltas da BR. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos após a adequação, retirando-se os valores de ganhos do circuito amplificador e divididos por cinco.

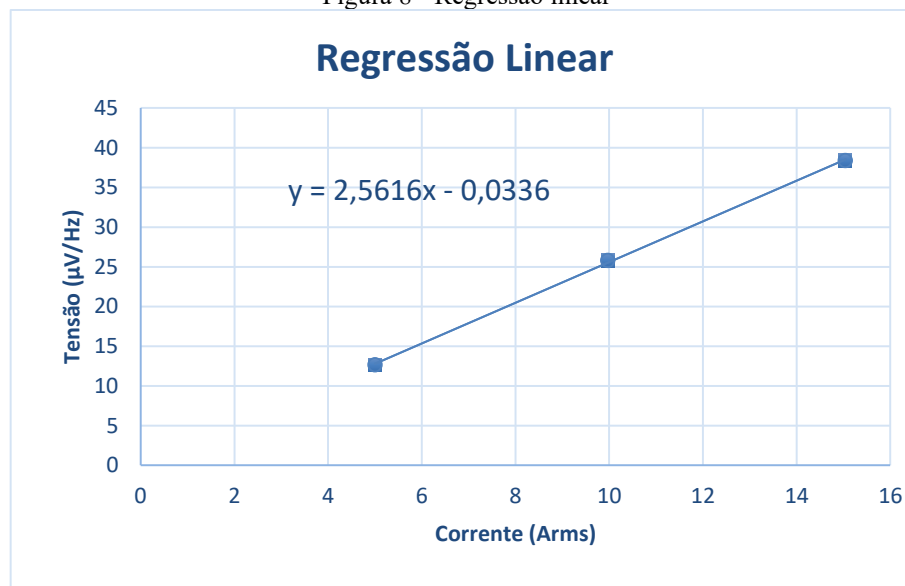
Tabela 1 - Valores adequados

CORRENTE (A)	TENSÃO (μV)
5,001	12,636
9,971	25,785
15,044	38,365

Fonte: autor

Com estes valores foi feita uma regressão linear, resultando a curva apresentada na Figura 8. Esta curva obedece à equação linear também mostrada na mesma figura. Pela equação, existe *offset* negativo de $0,0336 \mu\text{V}$, proveniente da eletrônica do equipamento. O valor da sensibilidade da BR é de $2,5616 \mu\text{V}/\text{A}$, isto é, para cada acréscimo de 1 A na corrente o sensor adiciona $2,5616 \mu\text{V}$, em 60 Hz, nos seus terminais.

Figura 8 - Regressão linear



Fonte: autor

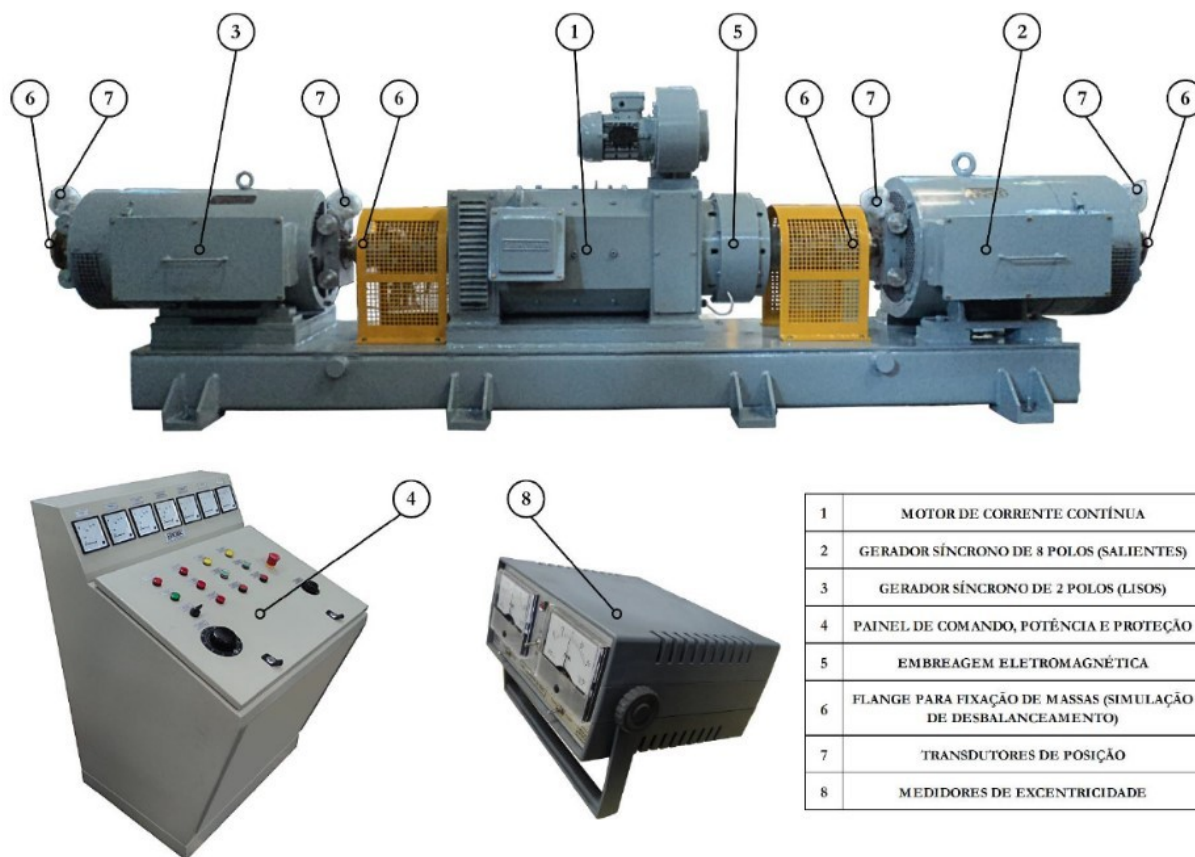
4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO EM LABORATÓRIO

Com o intuito de investigar se a corrente de neutro possui informações relevantes para detecção de faltas incipientes em GSs, foram realizados vários ensaios inserindo defeitos em um GS em um ambiente controlado. Neste capítulo, são explicados a bancada de ensaios utilizada e os tipos de faltas que foram propositalmente inseridas no GS nesse trabalho. Também o sistema de aquisição e o processamento dos dados são descritos resumidamente.

4.1 A BANCADA DE ENSAIOS

A bancada empregada para o desenvolvimento de ensaios e medições em laboratório se encontra no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ), do departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, e foi fabricada pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. Ela é composta por três máquinas fixadas sobre uma base comum: um motor de corrente contínua para atuar como máquina primária, um gerador síncrono de 8 polos salientes e um gerador síncrono de 2 polos lisos. Também possui um painel de comando, potência, proteção e sinalização do conjunto. Os equipamentos que fazem parte do sistema podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9- Bancada de simulação de defeitos em máquina síncronas



Fonte: (EQUACIONAL, 2014)

Este trabalho foca apenas no gerador de 8 polos, visto que seu rotor contém polos salientes, assim como os hidrogeradores. Neste gerador, cujos parâmetros nominais estão presentes na Tabela 3, é possível implementar propositalmente algumas faltas:

- Curto-circuito entre lâminas do núcleo estático: conectando dois bornes da placa de bornes, é possível simular um curto-circuito de lâminas do núcleo através da inserção de uma espira que enlaça uma parte do pacote até o primeiro duto de ventilação, conforme mostra a Figura 10.
- Curto-circuito de espiras enrolamento de campo: esta falta é inserida por meio de taps que diminuem o número de espiras de um dos polos do rotor, conforme a Figura 11. Os terminais destes taps são conectados a anéis coletores, que são acessados por uma placa de bornes, que fica na caixa de ligação da máquina. O enrolamento de campo quando na condição sadia possui os terminais J e K conectados em um barramento de corrente contínua. Para simular um curto-circuito de espiras nesse enrolamento basta conectar J com J1, J2 ou J3.
- Curto-circuito no enrolamento do estator e redução do número de espiras de um polo do estator: o gerador possui um enrolamento trifásico de 8 polos. Cada fase possui 8

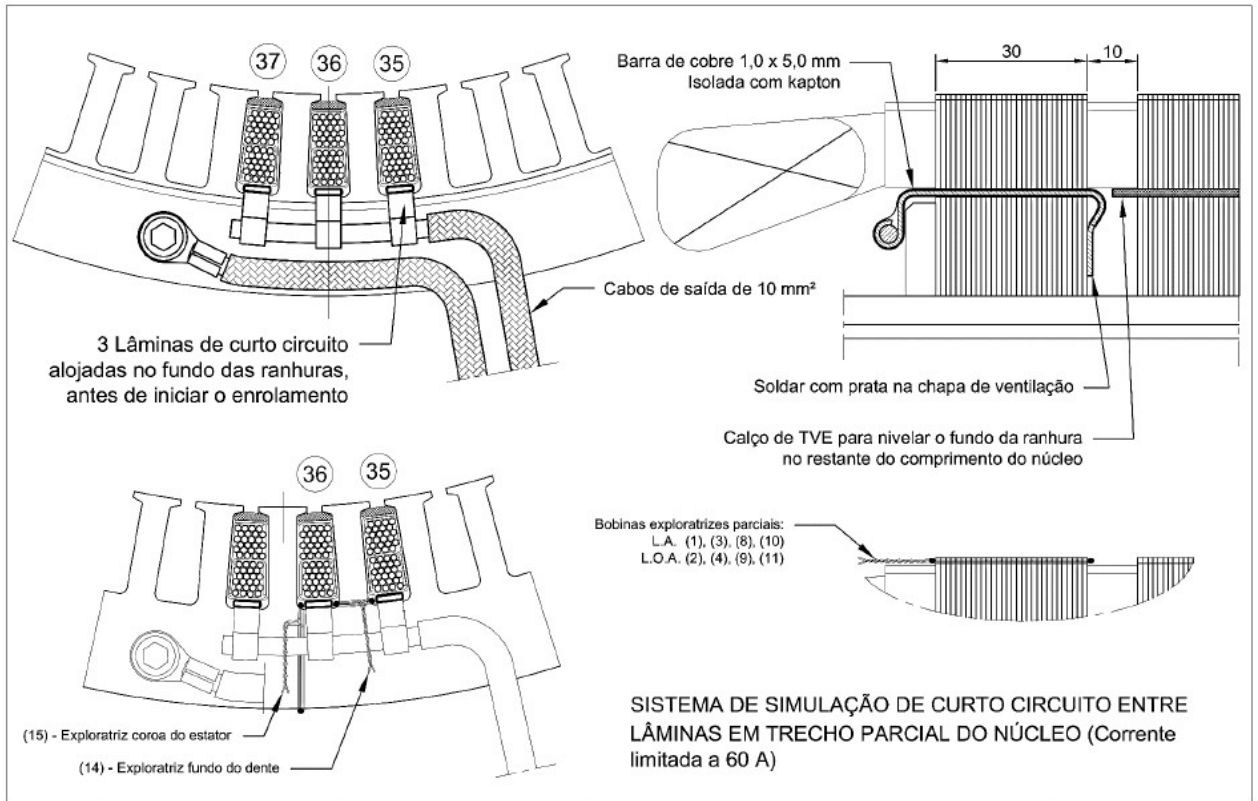
bobinas contendo 18 espiras cada. Como pode ser observado na Figura 12, sete desses polos contém um número fixo de espiras e um dos polos permite ter seu número de espiras alterado. Se a conexão com a rede for através de A1, A2 ou A3, ao invés de A0, simula-se uma redução no número de espiras de um dos polos da fase A. Para simular um curto-circuito de espiras basta conectar A1, A2 ou A3 com um tap adjacente. Nesse caso, são utilizados resistores de potência em série, para limitar a corrente que circula nesse trecho quando curto-circuitado e dessa forma não danificar a isolação do enrolamento.

Tabela 2 - Parâmetros nominais da bancada

Descrição	Motor de Corrente Contínua	Gerador Síncrono de 8 Polos Salientes
Potência	10 kW (5 + 5)	10 kVA
Rotação (Tipo de Ligação)	700 (SER) / 4000 (PAR) RPM	750 / 900 RPM
Tensão de Armadura	220 V (SÉRIE/PARALELO)	380 V (Y + N)
Corrente de Armadura	56 A	15,2 A
Frequência	CC	50 / 60 Hz
Tensão de Campo	220 V	220 V
Corrente de Campo	5,5 / 1,6 A	3,5 A
Fator de Potência	-	0,8 indutivo
Classe de Isolamento	155°C (F)	155°C (F)
Tipo de Resfriamento	Ventilação Forçada	Autoventilado

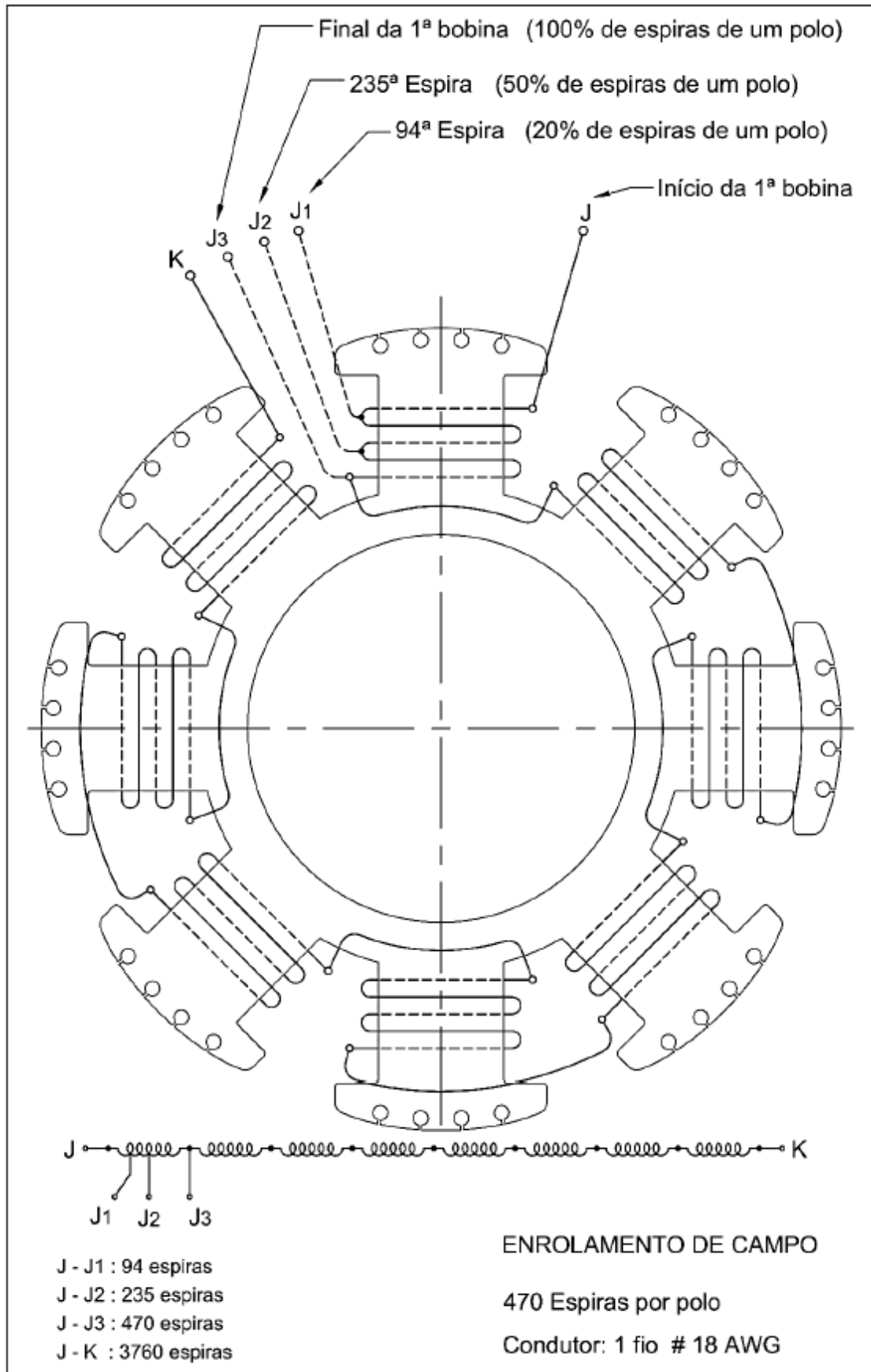
Fonte: (EQUACIONAL, 2014)

Figura 10 - Esquema para simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator



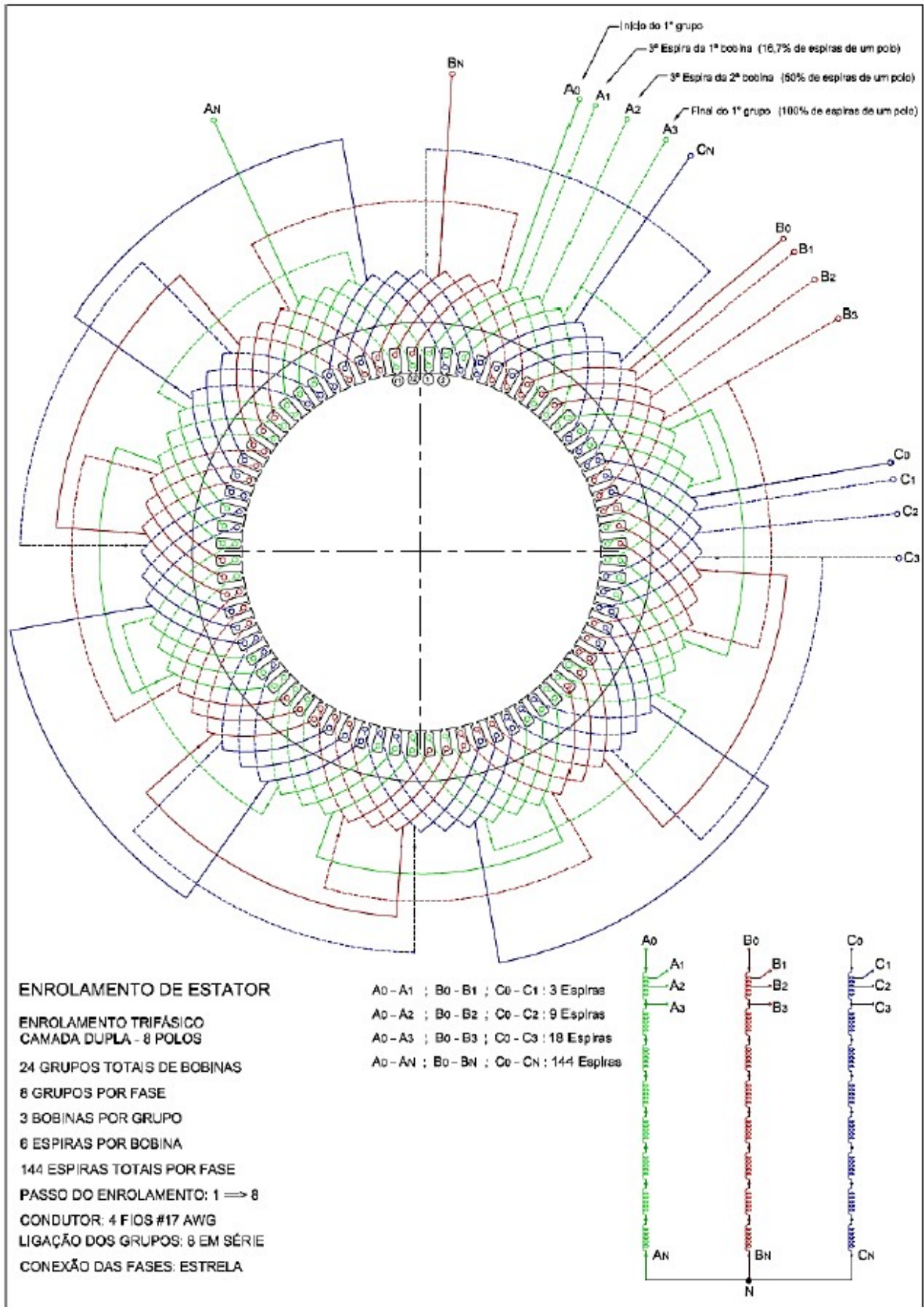
Fonte: (EQUACIONAL, 2014)

Figura 11 - Bobinagem de campo do gerador síncrono de 8 polos



Fonte:

Figura 12 - Bobinagem de armadura do gerador síncrono de 8 polos



Fonte: (EQUACIONAL, 2014)

Os tipos de faltas que a bancada consegue simular são possíveis de ocorrer em máquinas síncronas, estando comumente associadas a defeitos no sistema de arrefecimento, degradação do material isolante, desgastes de isolantes por envelhecimento ou por vibração excessiva, por exemplo. O presente trabalho apresenta no capítulo subsequente resultados com a imposição dos tipos de falta descritos anteriormente obtidos através da monitoração da corrente de neutro.

Os defeitos são impostos por meio de um sistema de chaveamentos acionados de maneira automatizada por um hardware desenvolvido em (HESSMANN, 2018).

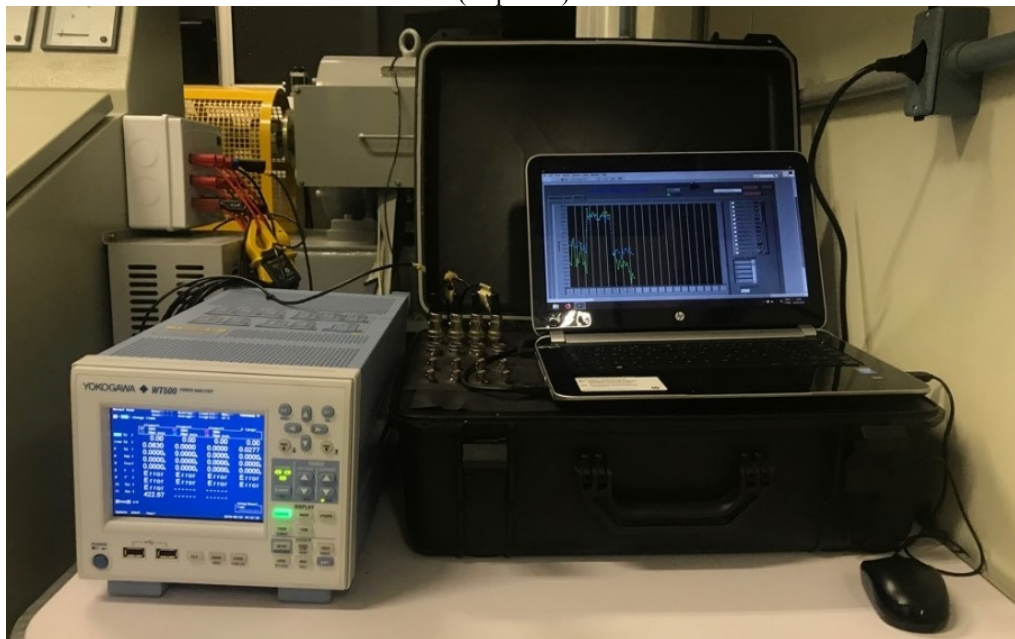
4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Os sinais provenientes da bobina de Rogowski passam por uma etapa de condicionamento antes de serem processados pelo *software* de análise. A seguir, são explanadas as etapas de cada um desses processos.

4.2.1 Condicionamento do sinal

No trabalho (DOS SANTOS, 2016), foi desenvolvido um *hardware* capaz de fazer o condicionamento de sinais de sensores de campo magnético disperso, os quais têm natureza semelhante aos sinais da BR. Por isso, esse trabalho fez uso deste equipamento. A eletrônica responsável pela amplificação e filtragem e pelo condicionamento do sinal está contida dentro do dispositivo (maleta preta) apresentado na fotografia da Figura 13. Na mesma figura, está o computador que contém o *software* e o analisador de energia utilizado.

Figura 13 - Maleta responsável pelo condicionamento dos sinais do sensor (direita) e analisador de energia (esquerda)



Fonte: autor

O sinal do transdutor é pré-amplificado com ganho fixo por um amplificador totalmente diferencial. Em seguida esse sinal é tratado por um amplificador instrumentação com uma alta rejeição ao ruído de modo comum, que é responsável por amplificar o sinal com certo ganho, ajustado automaticamente para que o nível de tensão seja adequado ao restante do circuito. Para atenuar ruídos e evitar o fenômeno do recobrimento (*aliasing*), foi empregado um filtro passa-baixas de 4ª ordem, com frequência de corte centrada em 4,7 kHz, pois a taxa de aquisição é de 10 kS/s.

Após essa etapa de amplificação e filtragem, o sinal é mantido num nível de tensão adequado para a conversão analógico-digital. O conversor A/D utilizado possui resolução de 16 bits e, como já mencionado anteriormente, realiza aquisições com uma taxa de amostragem de 10 kS/s. Os dados discretizados são processados pelo *software* apresentado a seguir.

4.2.2 Software utilizado na aquisição

Os dados digitalizados provenientes do conversor A/D são processados por um *software* desenvolvido em *LabVIEW* (*software* da *National Instruments*). Nele está implementado um algoritmo que é responsável por realizar a transformada rápida de Fourier (FFT), fazer o rastreamento das harmônicas da fundamental mecânica e armazenar os valores das magnitudes das harmônicas.

O equipamento realiza aquisições sucessivas com duração de 10 segundos cada. Após cada aquisição, é realizada a FFT do sinal, e as amplitudes das harmônicas de interesse são inseridas em gráficos de tendência, no que se chama aqui de “histórico”. Nestes gráficos, pode se visualizar quais componentes harmônicas tiveram suas amplitudes modificadas na ocorrência de cada falta.

5 ENSAIOS EM BANCADA

Neste capítulo serão explorados alguns tipos de falta com o aparato experimental descrito no capítulo anterior. Os ensaios foram feitos com o gerador sincronizado com a rede e com o neutro aterrado. A bobina de Rogowski foi enrolada em torno do cabo de neutro quatro vezes.

Como o GS ensaiado estava sincronizado com uma rede elétrica de 60 Hz, sua fundamental elétrica é igual a 60 Hz e as harmônicas elétricas são múltiplas desse valor. O GS possui 8 polos, portanto sua frequência mecânica, dada pela equação (2.2), é 15 Hz e as harmônicas mecânicas são múltiplas desse valor. Cabe ressaltar que as harmônicas elétricas também são harmônicas mecânicas.

Realizaram-se aquisições na condição sadia e com defeitos nos dois pontos de operação do gerador descritos abaixo. Os valores das potências foram medidos pelo analisador de energia *WT500 Power Analyzer* da fabricante *Yokogawa*.

- Ponto 1: Gerador fornecendo 5 kW de potência ativa e absorvendo 3 kvar de potência reativa da rede.
- Ponto 2: Gerador fornecendo 0,5 kW de potência ativa e absorvendo 5 kvar de potência reativa da rede.

As figuras usadas nas seções seguintes são gráficos de tendências das magnitudes das harmônicas da fundamental mecânica. Foram monitoradas as harmônicas desde a fundamental mecânica (15 Hz) até a 135ª harmônica (2025 Hz). As ordenadas do gráfico estão em dB Volt e as abcissas correspondem ao número de aquisições feitas, que ocorrem a cada 10 segundos. O intervalo entre as linhas vermelhas corresponde ao período de tempo em que a falta estava imposta.

5.1 CURTO-CIRCUITO DE ESPIRAS DO ROTOR

Neste ensaio, foram conectados os taps J e J2 (vide Figura 11) do enrolamento de campo, diminuindo o campo magnético gerado por um dos polos do rotor.

5.1.1 Ponto de operação 1

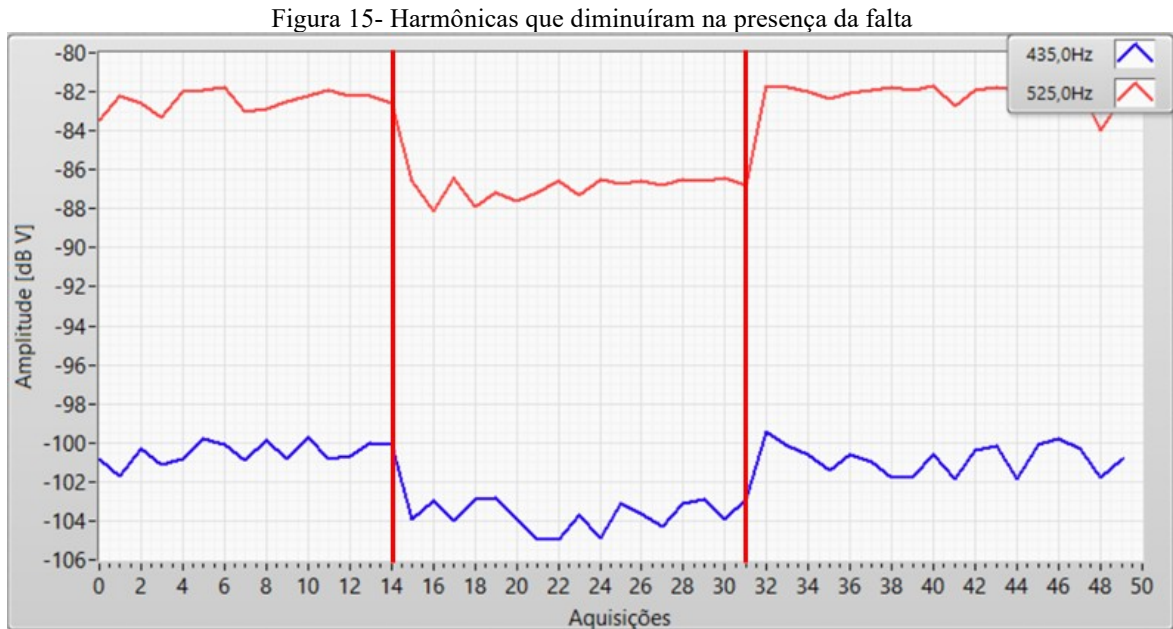
Como pode ser visto na Figura 14, várias harmônicas tiveram sua amplitude aumentada, em algumas delas o aumento foi de 10 dB.

Figura 14 - Harmônicas que aumentaram na presença da falta



Fonte:autor

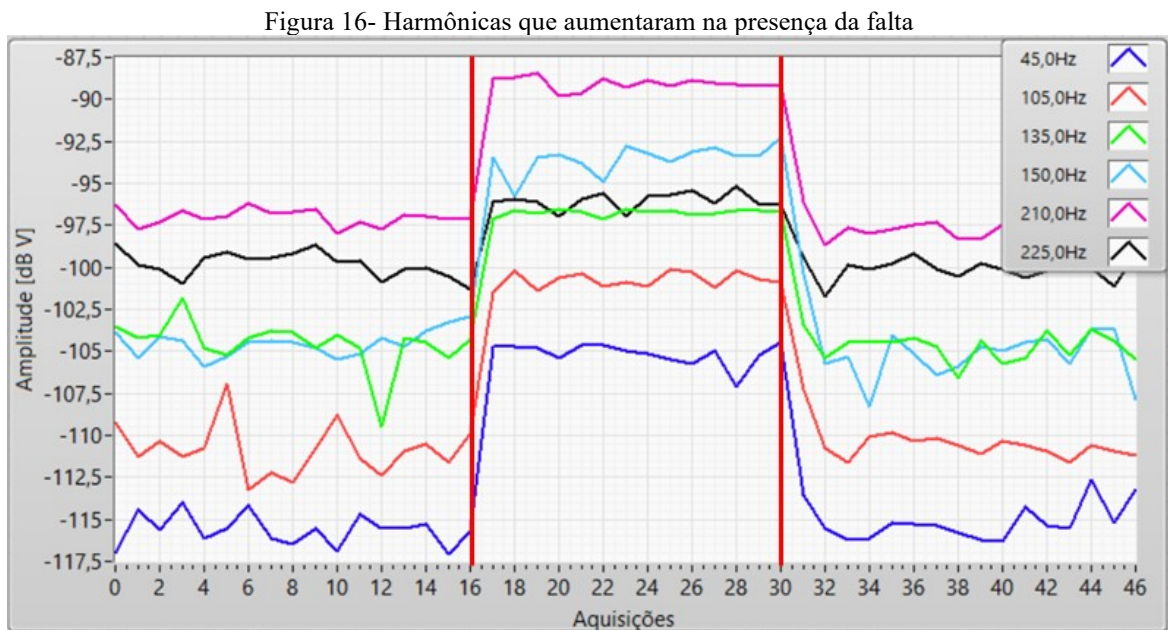
Cabe mencionar que duas das frequências monitoradas tiveram suas amplitudes diminuídas, foram elas a 29ª (435 Hz) e a 35ª (525 Hz) conforme mostra a Figura 15.



Fonte: autor

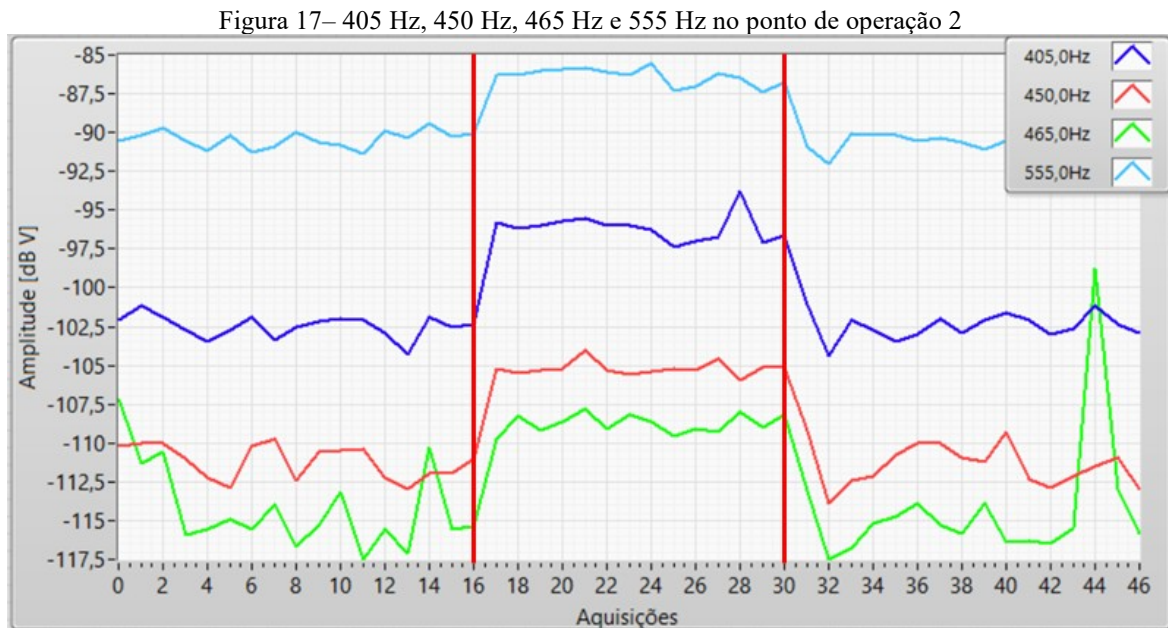
5.1.2 Ponto de operação 2

Mudando o ponto de operação da máquina, várias amplitudes de harmônicas que aumentaram no outro ponto, também aumentaram nesse, conforme mostra Figura 16.



Fonte: autor

Merecem destaque, por terem aumentado suas amplitudes nos dois pontos de operação, as frequências 405 Hz (27^a harmônica), 450 Hz (30^a), 465 Hz (31^a) e 555 Hz (37^a). Essas harmônicas se mostraram interessantes de serem observadas durante faltas no enrolamento de campo e estão ilustradas na figura abaixo.



Fonte: autor

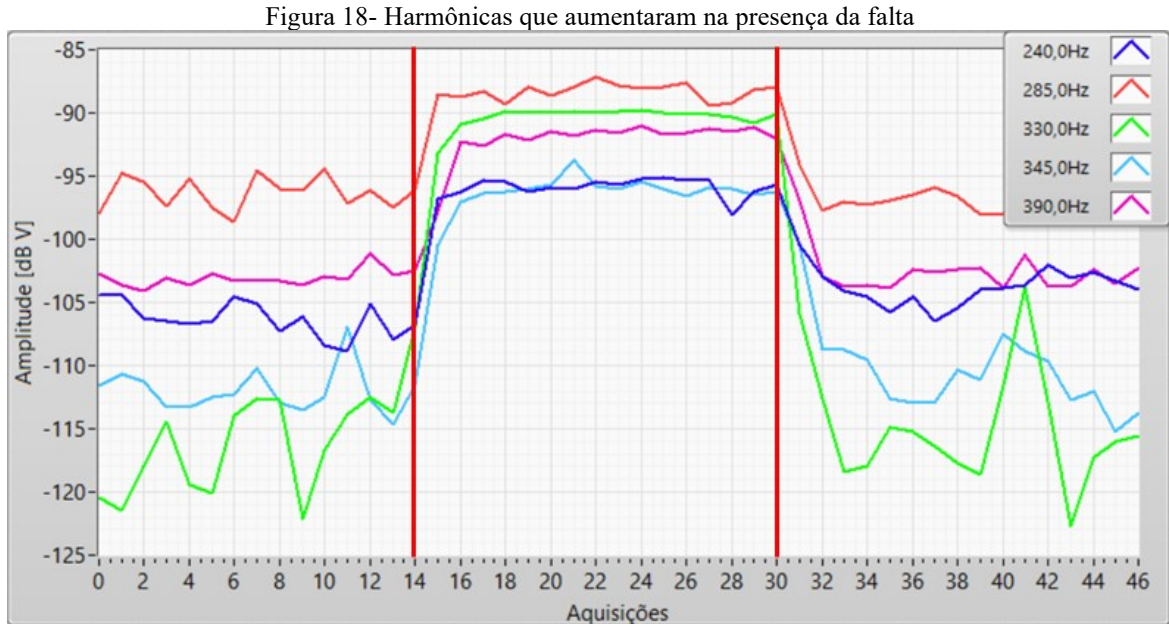
De maneira geral, as harmônicas elétricas não se mostraram capazes de detectar uma falta no rotor. Para uma falta de rotor, no ponto de operação 1, o aumento nas harmônicas sensibilizadas foi maior. Cabe lembrar que, em ambos os pontos, as frequências que se alteraram na presença da falta foram abaixo de 600 Hz.

5.2 REDUÇÃO NO NÚMERO DE ESPIRAS DE UM POLO DO ESTATOR

Neste ensaio, a conexão com a rede da fase C do estator foi feita diretamente pelo tap C1 (vide Figura 10), diminuindo três das 18 espiras de um dos polos da fase C. Esse desbalanceamento de uma das fases fez com que várias harmônicas aumentassem suas amplitudes nos dois pontos de operação.

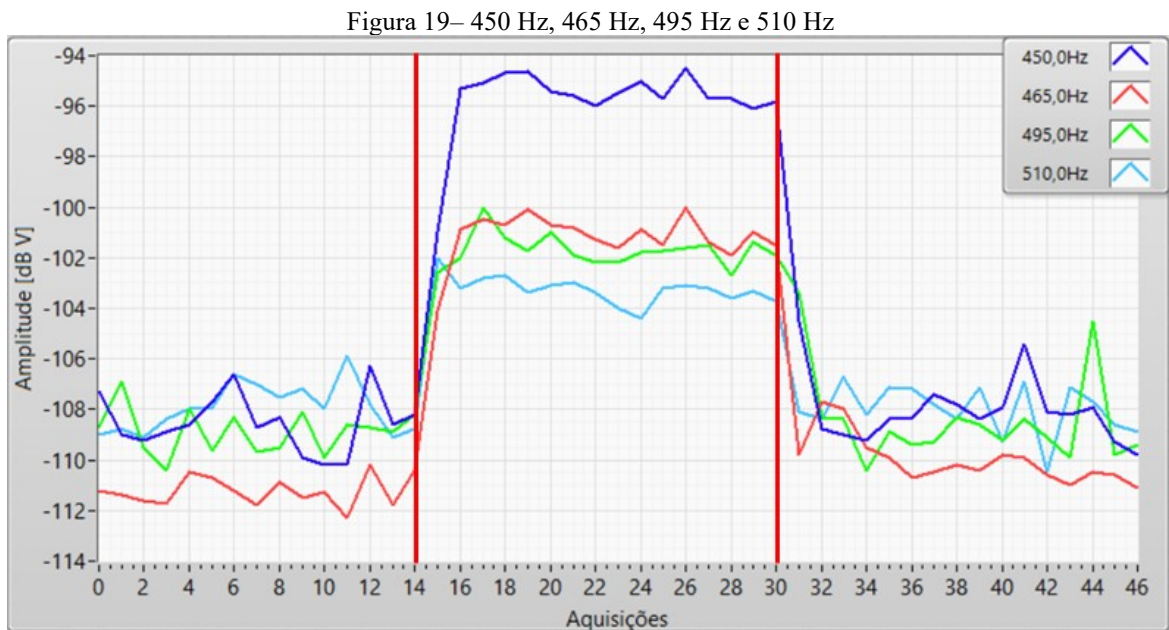
5.2.1 Ponto de operação 1

Algumas das harmônicas de baixa frequência (16^a, 19^a, 22^a, 23^a e 26^a) aumentaram na presença da falta, como pode ser visto na Figura 18.



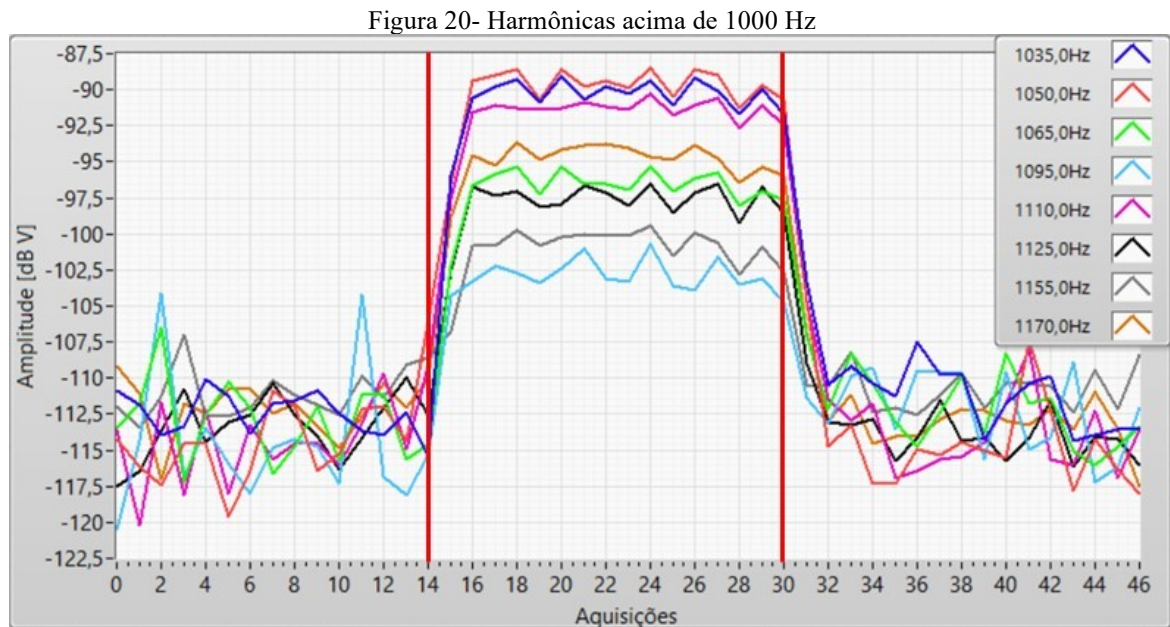
Fonte: autor

Várias outras harmônicas tiveram suas amplitudes alteradas, como mostra a figura abaixo. A amplitude da harmônica elétrica de 480 Hz não foi alterada.



Fonte: autor

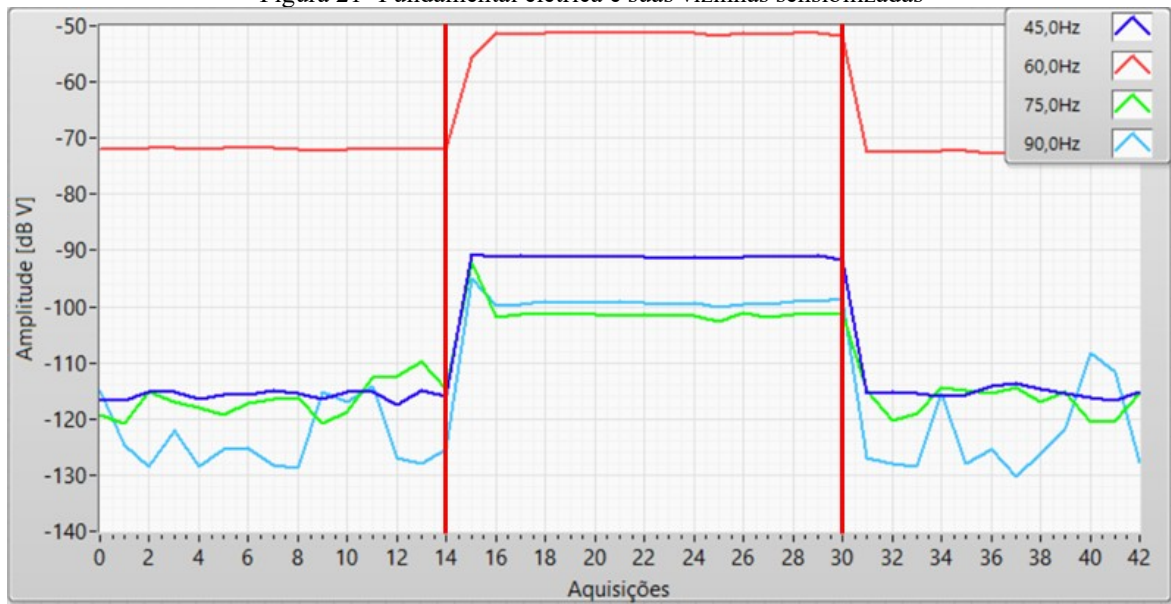
A Figura 20 apresenta algumas harmônicas acima de 1000 Hz que foram sensibilizadas pelo defeito. Nesta faixa de frequência, as múltiplas da fundamental elétrica 1080 Hz e 1140 Hz não tiveram um aumento significativo em dB Volt.



5.2.2 Ponto de operação 2

Com a máquina atuando como compensador e absorvendo reativo da rede, algumas das primeiras harmônicas, inclusive a fundamental elétrica, tiveram um aumento notável, como mostra a Figura 21. A fundamental elétrica, por exemplo, teve um aumento de 20 dB Volt, o que corresponderia a um aumento de 10 vezes no valor da amplitude dessa harmônica.

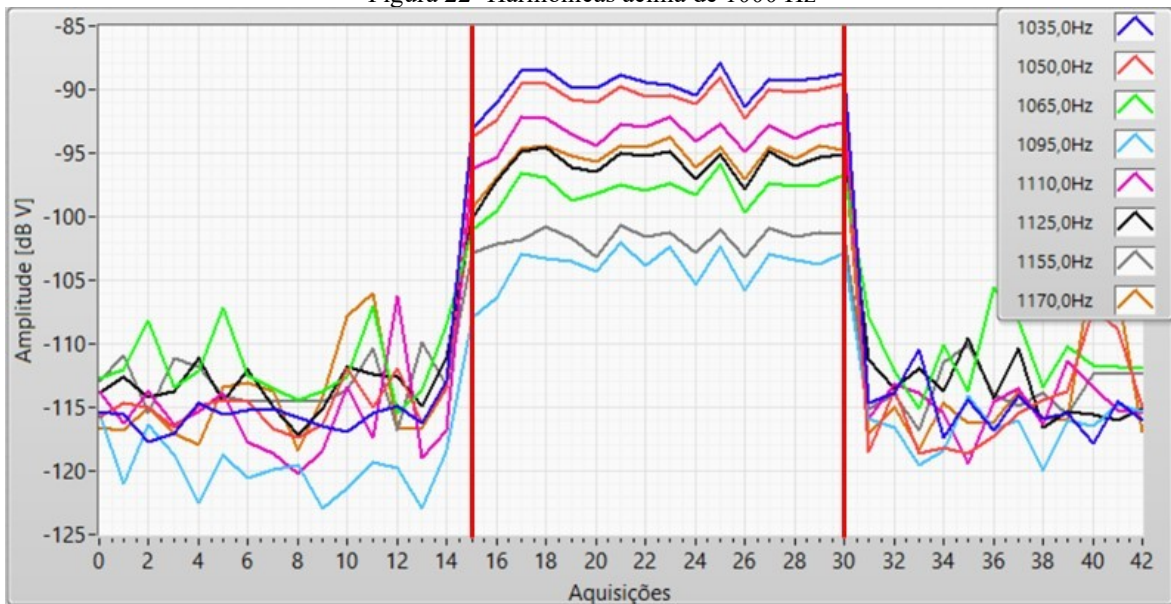
Figura 21- Fundamental elétrica e suas vizinhas sensibilizadas



Fonte: autor

Nesse ponto de operação, as mesmas harmônicas da Figura 20 tiveram suas amplitudes aumentadas na presença da falta, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22- Harmônicas acima de 1000 Hz



Fonte: autor

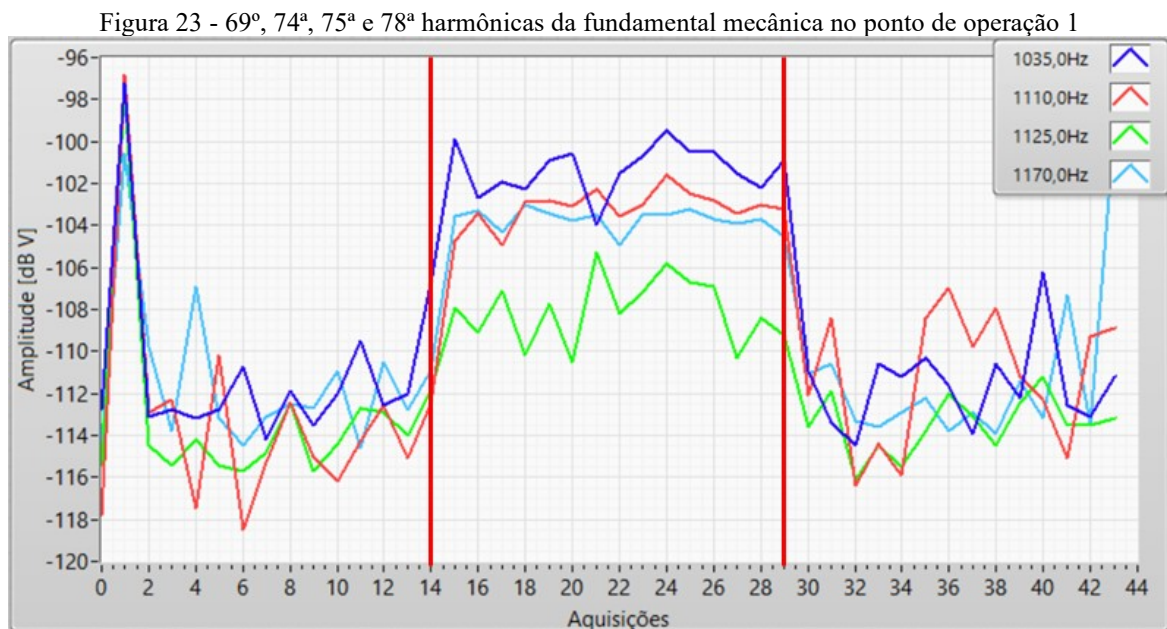
Este tipo de falta sensibilizou até mesmo harmônicas acima de 1000 Hz e se mostrou mais evidente no espectro magnético no ponto de operação 2.

5.3 CURTO-CIRCUITO DE ESPIRAS DO ESTATOR

Neste ensaio, foram colocadas em curto-circuito as derivações C0 e C1 (vide Figura 12), simulando um curto-circuito entre 3 espiras.

5.3.1 Ponto de operação 1

Para este ponto de operação, merecem destaque as frequências: 1035 Hz (69^a), 1110 Hz (74^a), 1125 Hz (75^a) e 1170 Hz (78^a), com o comportamento das amplitudes mostradas na Figura 23.

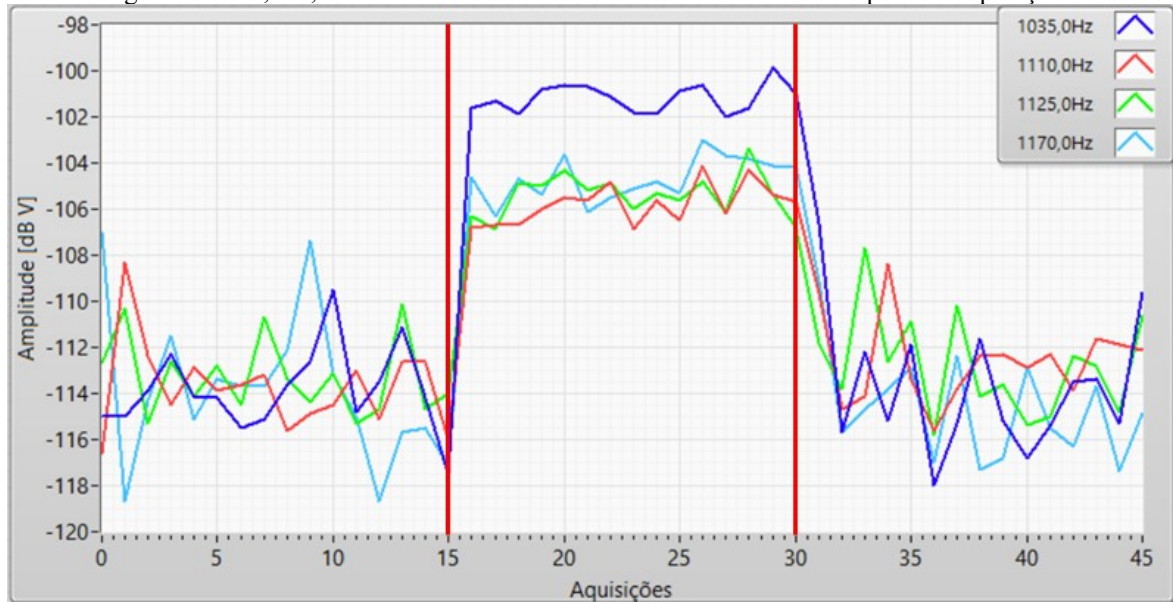


Fonte: autor

5.3.2 Ponto de operação 2

Com a mudança do ponto de operação da máquina, as mesmas harmônicas tiveram menos oscilações na presença da falta. Isso pode ter sido ocasionado pela diminuição da potência ativa da máquina.

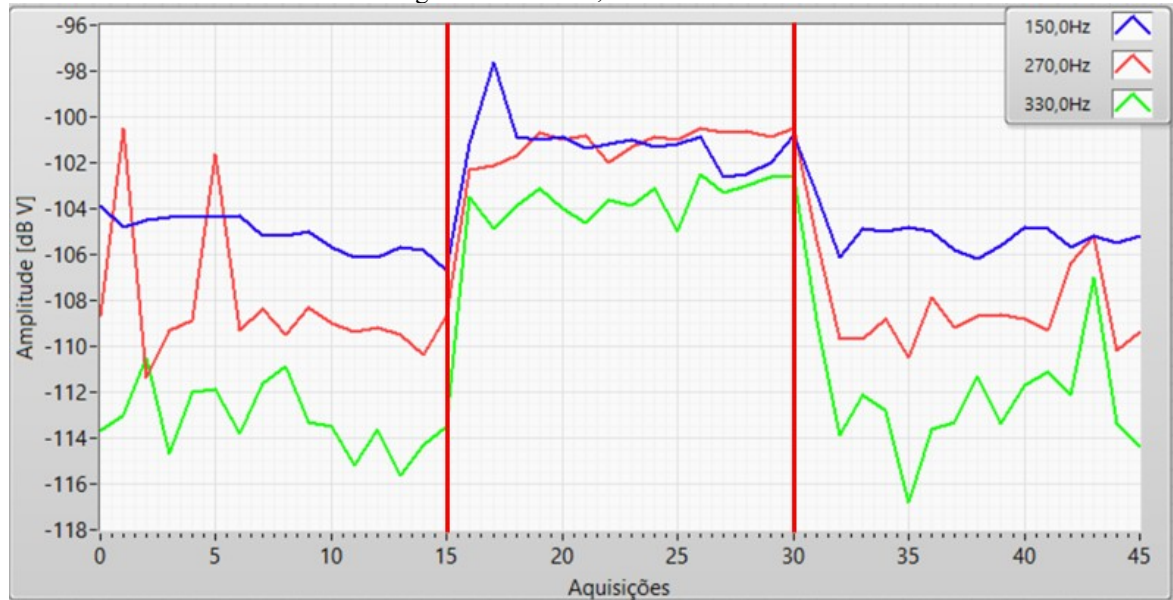
Figura 24 - 69^a, 74^a, 75^a e 78^a harmônicas da fundamental mecânica no ponto de operação 2



Fonte: autor

Neste ponto de operação, algumas das primeiras harmônicas também tiveram suas amplitudes aumentadas, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 - 150 Hz, 270 Hz e 330 Hz



Fonte: autor

De maneira geral, essa falta se mostrou mais fácil de ser detectada no ponto de operação 2. O curto-circuito de espiras do estator em ambos os pontos alterou frequências acima de 1000 Hz.

5.4 CURTO-CIRCUITO DE CHAPAS DO ESTATOR

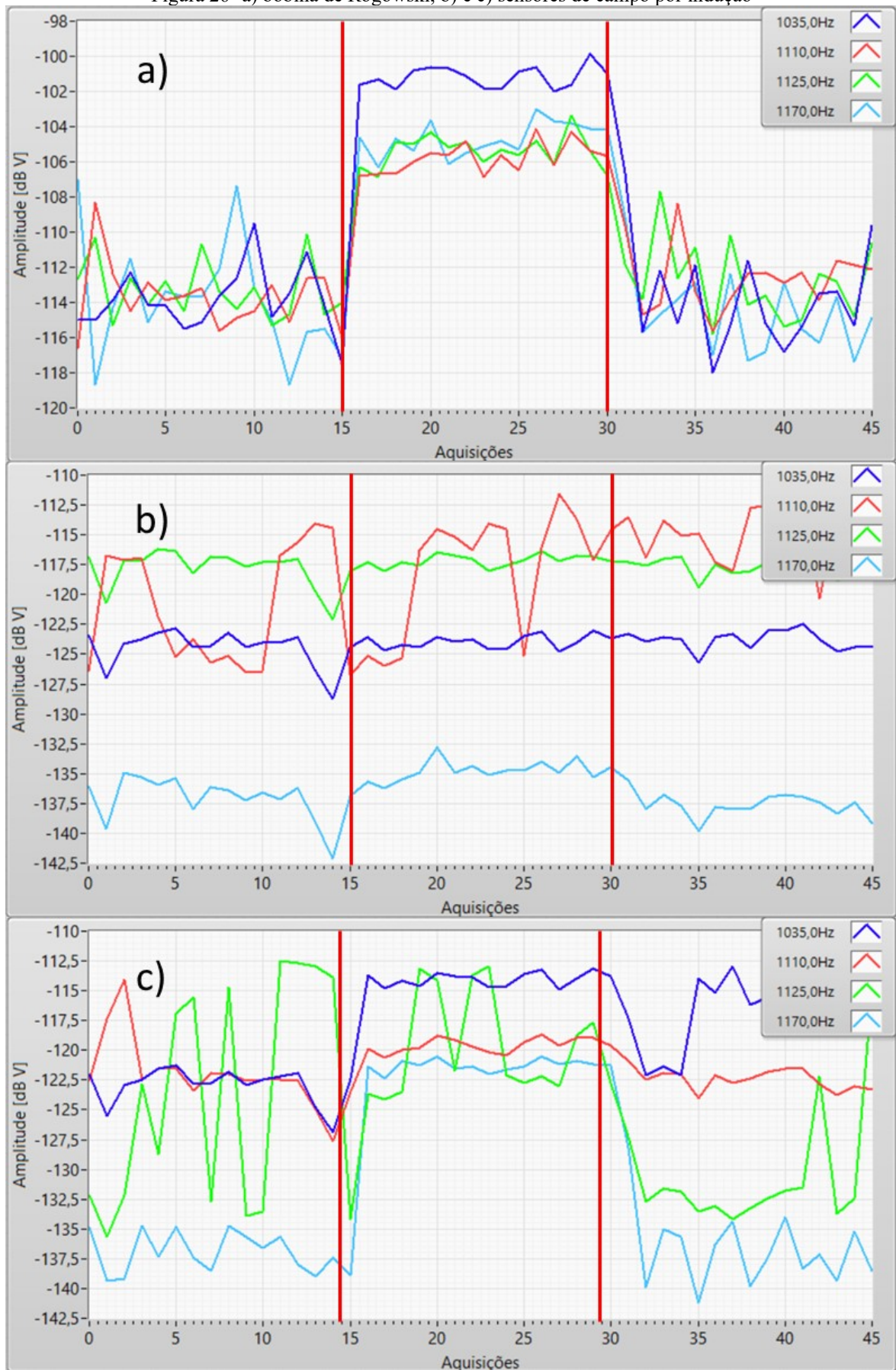
Nenhuma harmônica pareceu se alterar durante o período em que a falta ocorreu. Isso indica que a corrente de neutro não contém informações que possam sugerir que a máquina possui algum tipo de falha na isolação das chapas do núcleo.

5.5 COMPARAÇÃO COM SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO

Com o intuito de comparar os dois tipos de sensores, nos ensaios realizados também foram feitas aquisições com dois sensores de campo magnético por indução. Eles foram colocados com o eixo tangenciando a carcaça do gerador de maneira a serem sensibilizados pelo campo magnético disperso. Seus sinais de tensão também tiveram o mesmo tratamento analógico e processamento que a bobina de Rogowski.

Quando foi imposto um curto-circuito entre as espiras do estator com a máquina no ponto de operação 2 (vide seção 5.3.2) algumas harmônicas medidas pela BR foram sensibilizadas pela falta. Na Figura 26 foram comparados os gráficos de tendências das harmônicas adquiridas pela bobina de Rogowski e pelos sensores de campo magnético por indução. Aqui só foram analisadas as componentes em que houve alteração das amplitudes quando se empregou o sensor BR.

Figura 26- a) bobina de Rogowski, b) e c) sensores de campo por indução

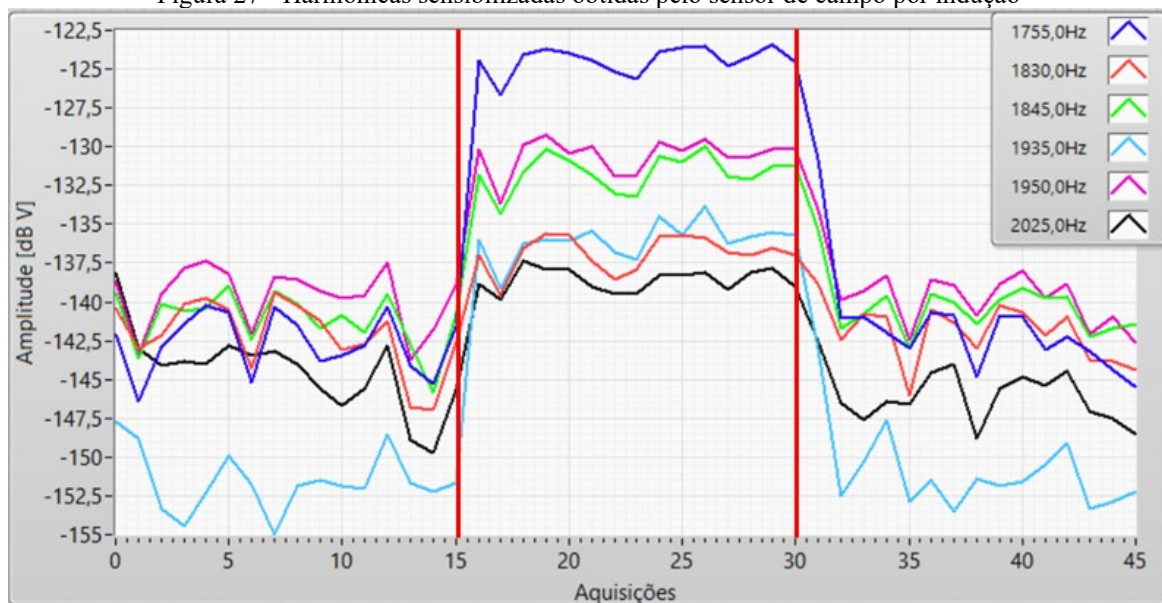


Fonte: autor

Um dos sensores de campo magnético também teve uma de suas harmônicas com a magnitude aumentada na presença da falta. Cabe mencionar que os sensores de campo por indução tiveram um número maior de harmônicas sensibilizadas quando a falta foi imposta, porém em frequências diferentes do sensor de corrente de neutro.

A Figura 27 apresenta curvas de variação de amplitudes de algumas harmônicas que foram sensibilizadas em um dos sensores de campo por indução. Nota-se que essas harmônicas estão em frequências acima de 1700 Hz, algo que não ocorreu no sensor de corrente de neutro para nenhum tipo de falta.

Figura 27 - Harmônicas sensibilizadas obtidas pelo sensor de campo por indução



Fonte: autor

6 ANÁLISE DE DADOS OBTIDOS EM GERADOR DE USINA

Neste capítulo, com o intuito de averiguar a aplicabilidade em campo da metodologia, são avaliadas as aquisições da bobina de Rogowski instalada na unidade geradora 3 da usina hidrelétrica de Itá (DOS SANTOS, 2016).

6.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO INSTALADO

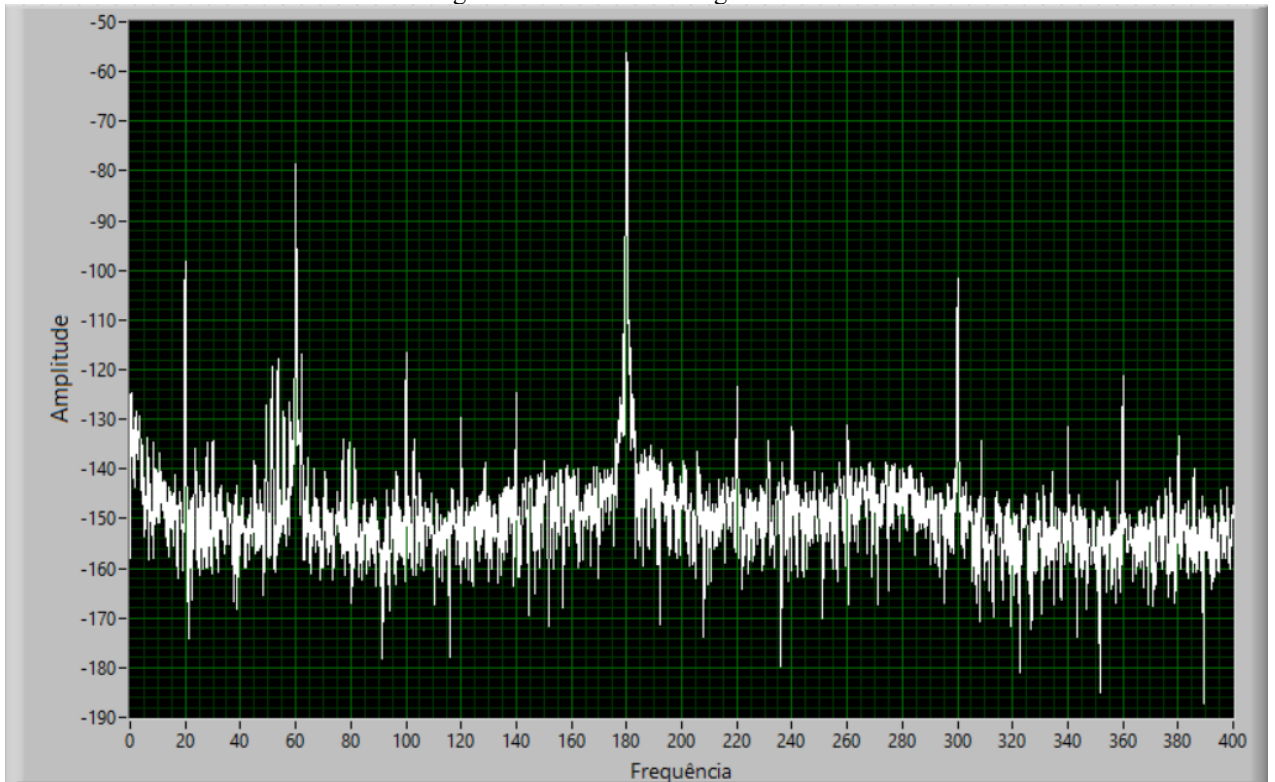
No trabalho (DOS SANTOS, 2016) foram instalados sete sensores de campo magnético por indução, seis do lado interno do *housing* de um gerador da Usina Hidrelétrica de Itá e um do lado externo, e uma bobina de Rogowski no neutro desse gerador. Todas as aquisições dos sensores de campo tiveram o mesmo condicionamento de sinal e processamento de dados descritos no subcapítulo 4.2. Porém a bobina de Rogowski, por ter uma tensão induzida maior que os sensores de campo, não recebeu nenhum tratamento analógico e nem foi processado pelo *software* do equipamento. As aquisições foram salvas em uma unidade de armazenamento instalada na usina. Para a análise desses dados foi necessário organizar os arquivos das aquisições, realizar a transformada rápida de Fourier, rastrear as harmônicas e traçar gráficos do espectro de magnitude para obter tendência com os históricos das magnitudes das harmônicas da fundamental mecânica.

6.2 RESULTADOS DA ANÁLISE

A partir dos gráficos obtidos, foram selecionadas algumas harmônicas para serem brevemente discutidas. O período analisado foi de 12 de novembro de 2015 até 25 de agosto de 2016.

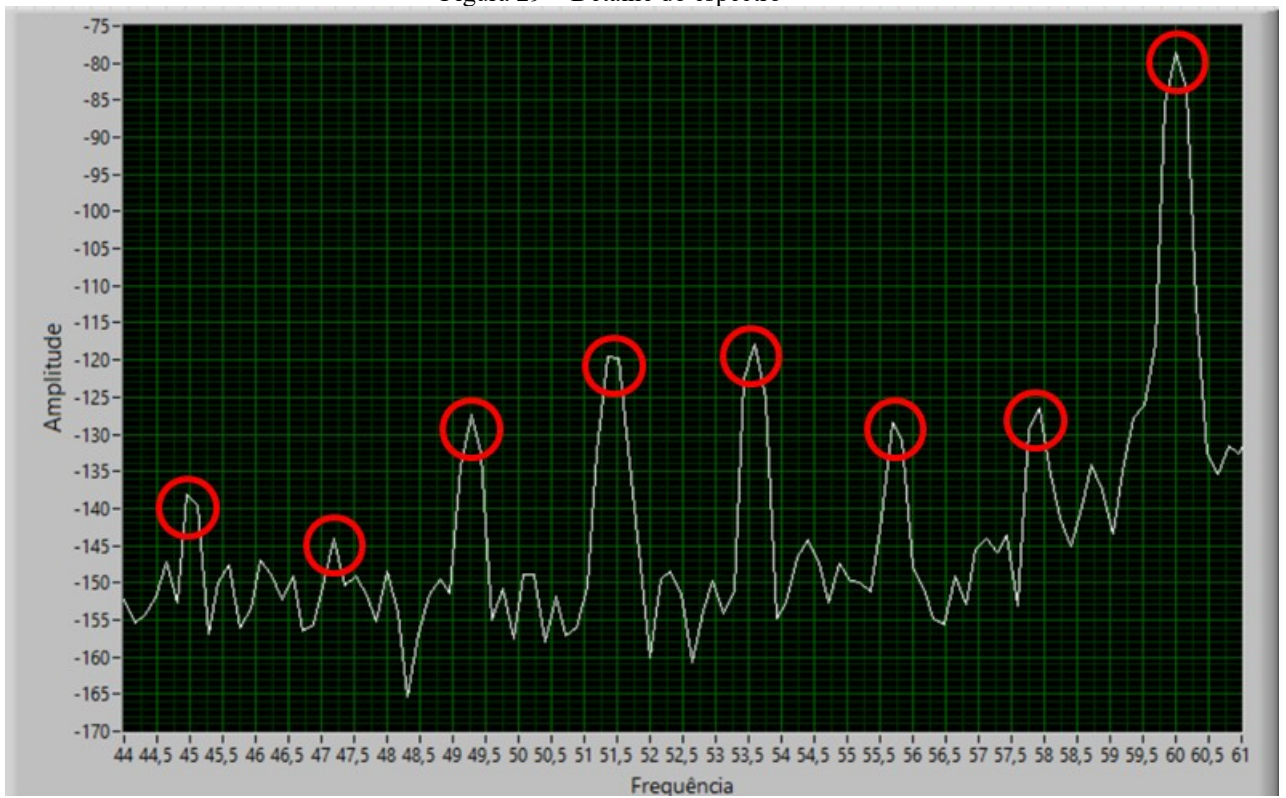
Empregando a BR na corrente de neutro, o espectro de magnitude, também chamado de assinatura magnética, de uma aquisição desse período, está mostrado na Figura 28. Nota-se que as maiores magnitudes pertencem às harmônicas elétricas, principalmente a de 180 Hz. Porém, na Figura 29, que é uma imagem ampliada do espectro de magnitudes, é possível notar que as fundamentais mecânicas também estão presentes. Na figura estão circuladas as harmônicas da fundamental mecânica, desde a 21^a (45 Hz) até a 28^a (60 Hz).

Figura 28 – Assinatura magnética



Fonte: autor

Figura 29 – Detalhe do espectro

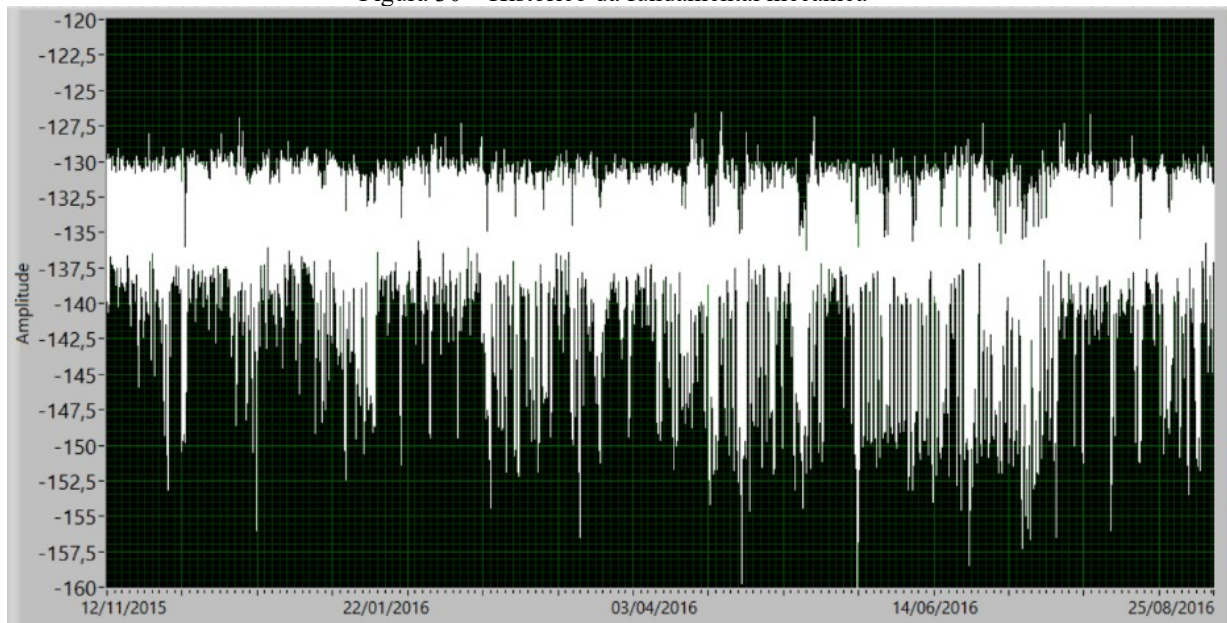


Fonte: autor

Constata-se, por este resultado, que a corrente de neutro de um gerador de usina possui informações acerca das harmônicas mecânicas, o que indica que sua assinatura magnética pode ser empregada para detectar faltas incipientes.

O histórico das magnitudes da fundamental mecânica está na figura abaixo.

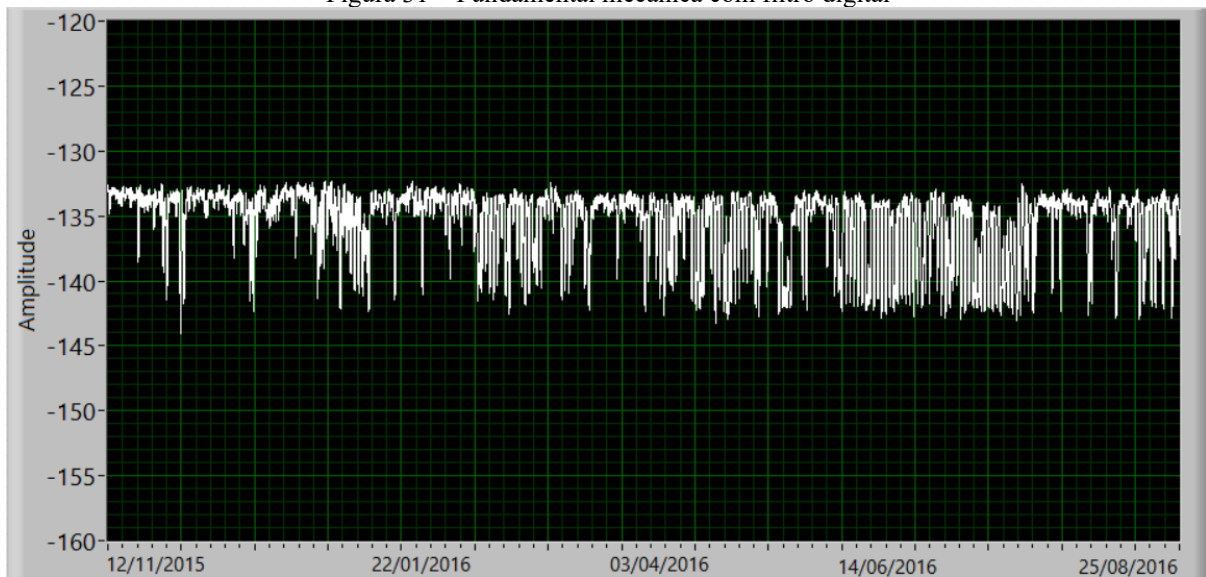
Figura 30 – Histórico da fundamental mecânica



Fonte: autor

Devido a ausência de condicionamento, existe uma dispersão muito grande deste sinal, e por isso optou-se por implementar um filtro digital, do tipo média móvel, com 50 amostras no intervalo. Todos os gráficos a partir daqui tiveram esse tratamento. A Figura 31 apresenta o histórico das magnitudes da fundamental mecânica após a filtragem digital. As alterações na magnitude da fundamental mecânica, muito provavelmente, se devem às mudanças nos pontos de operação da máquina.

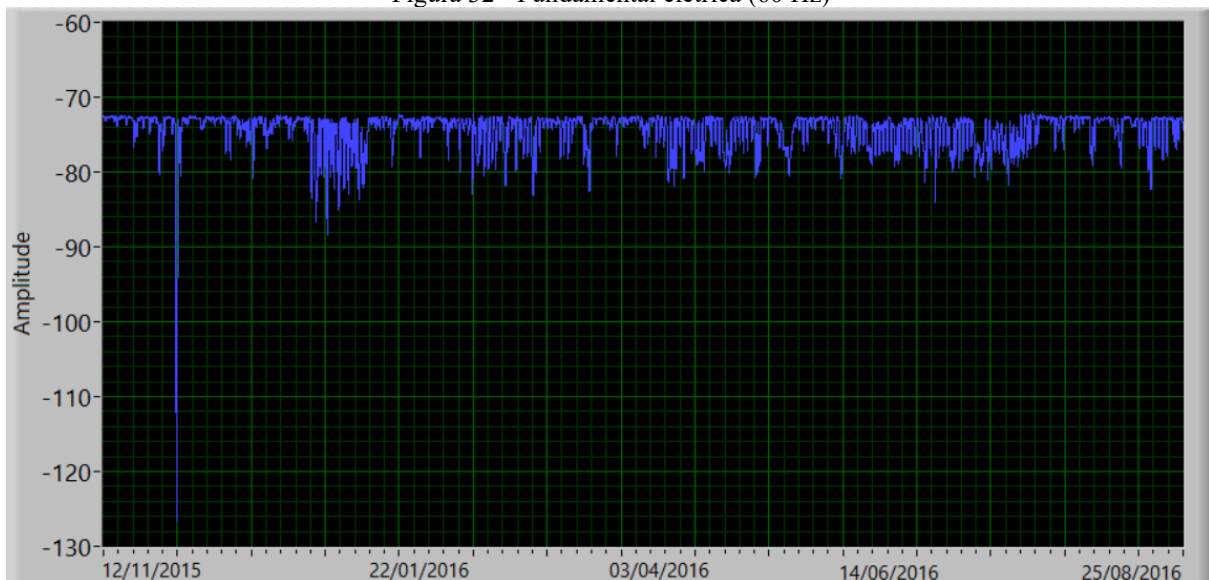
Figura 31 – Fundamental mecânica com filtro digital



Fonte: autor

O histórico da fundamental elétrica (60 Hz) é mostrado na Figura 32. Na fundamental elétrica também não existiram alterações significativas ou persistentes, com exceção de uma queda abrupta no começo do período, que indica que a máquina estava parada.

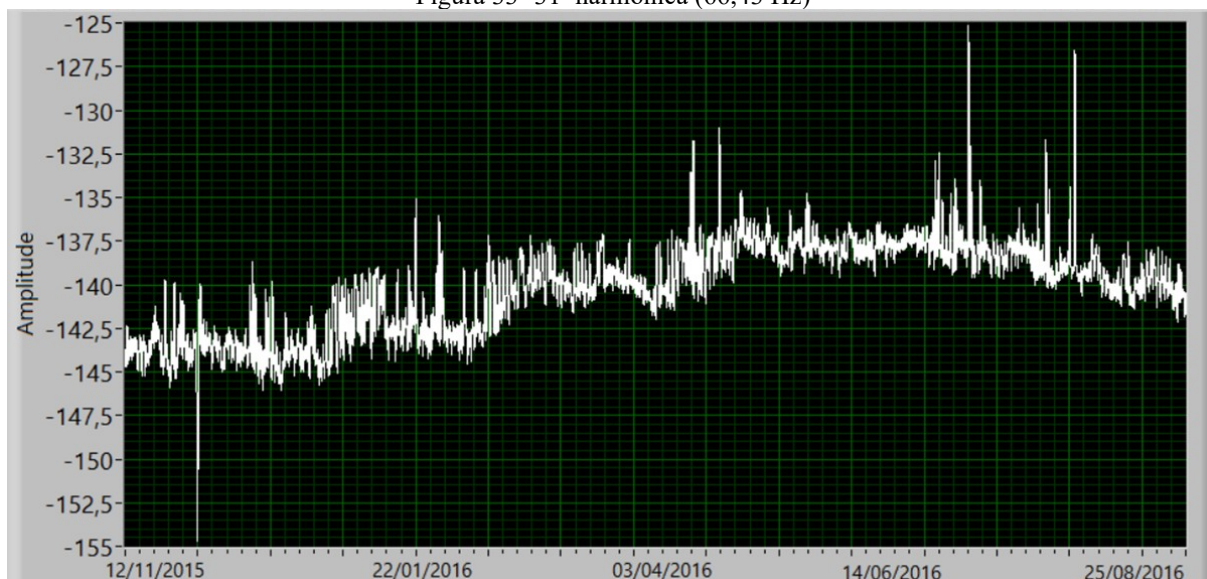
Figura 32 - Fundamental elétrica (60 Hz)



Fonte: autor

A Figura 33 apresenta o histórico da amplitude da 31ª harmônica mecânica (66,43 Hz). Nota-se que há um crescimento persistente. No final do período de análise, sua amplitude voltou a diminuir.

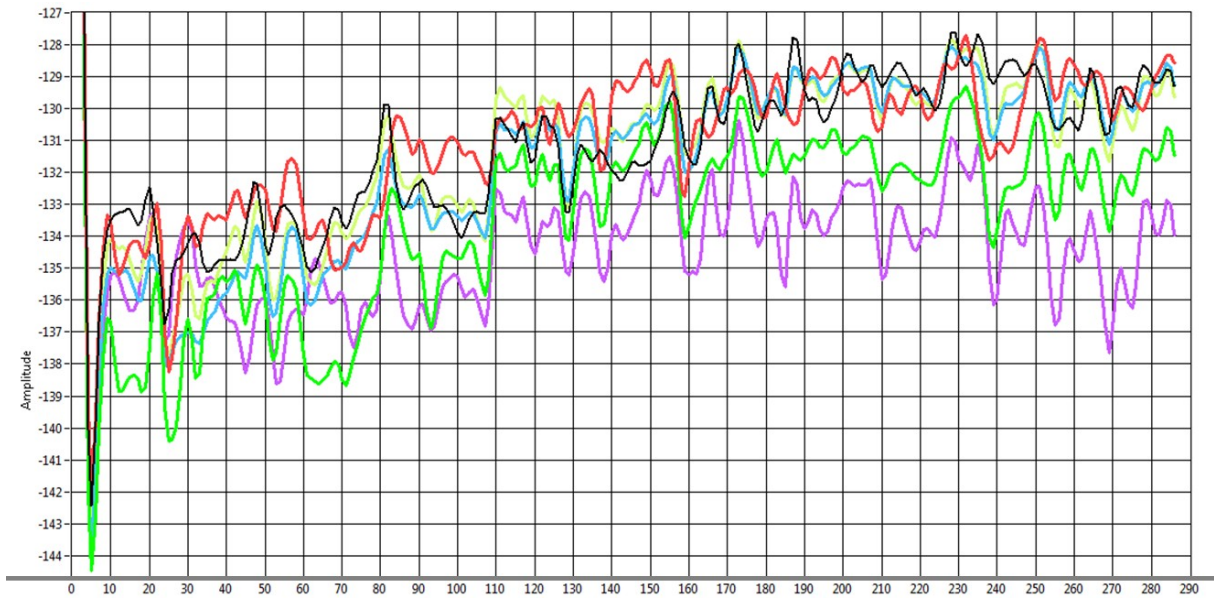
Figura 33- 31ª harmônica (66,43 Hz)



Fonte: autor

A amplitude da harmônica de frequência 66,43 Hz adquirida pela BR, apresentou um comportamento semelhante à amplitude da harmônica de frequência 302,14 Hz do campo magnético externo, medida pelos sensores de campo magnético por indução. A Figura 34 mostra o histórico da magnitude dessa harmônica no período até agosto de 2016. No trabalho de (FREITAS, 2019), utilizando os dados obtidos pelos mesmos sensores de campo por indução, porém analisando até a data de 2018, é apresentada uma detecção de falta incipiente no gerador em questão num período posterior ao analisado. Nos resultados constam harmônicas que tiveram comportamento que permitiram detectar a falta, dentre elas a frequência 302,14 Hz citada.

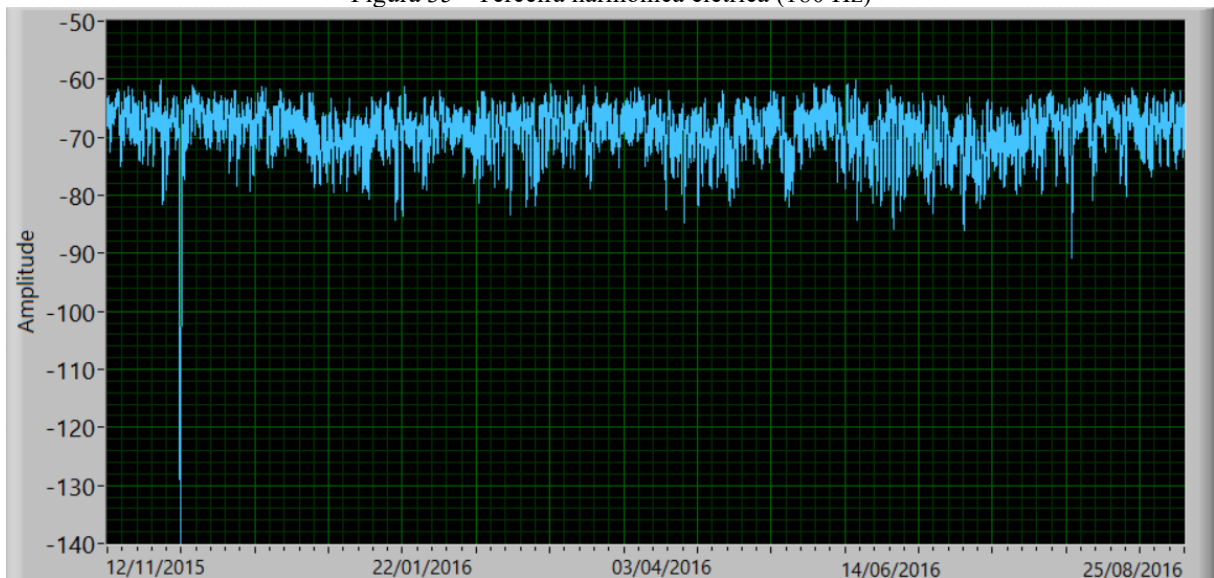
Figura 34 – 141ª harmônica mecânica (302,14 Hz) medida pelos sensores de campo magnético por indução instalados na usina



Fonte: Adaptado de (FREITAS, 2019)

A terceira harmônica elétrica (Figura 35), ou 84ª harmônica da fundamental mecânica, foi a que teve maior amplitude em todo período.

Figura 35 - Terceira harmônica elétrica (180 Hz)



Fonte: autor

Com os resultados apresentados, não há o que se concluir significativamente. Os dados da usina não permitem uma avaliação clara do efeito das faltas, devido à impossibilidade de imposição de faltas. Pode-se afirmar que o espectro da derivada da corrente de neutro do GS da usina é semelhante aos medidos na bancada de ensaios e que as harmônicas mecânicas são visíveis (Figura 29). Isso é indicativo de que a corrente de neutro

pode servir para detectar faltas incipientes. Porém, a variabilidade das amplitudes medidas no GS da usina, causada pela falta de condicionamento, impedem uma análise mais profunda.

7 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Pelos resultados obtidos na bancada de ensaios, conclui-se que o monitoramento da corrente de neutro através da bobina de Rogowski é capaz de complementar a metodologia de monitoramento do campo magnético externo. Para curto-circuito de espiras de um polo do rotor, várias frequências abaixo de 600 Hz conseguiram detectar a presença desta falta. Para os defeitos em que um reduzido número de espiras de um polo de uma fase do estator foi retirado e de curto-circuito de espiras do estator, ocorreu sensibilização de algumas harmônicas em frequências próximas a 400 Hz. Estes defeitos foram notadamente mais percebidos ao analisar frequências próximas a 1100 Hz. A metodologia não obteve êxito em notar a presença de um curto-circuito de lâminas no pacote do estator.

Pela comparação entre a BR e o sensor de campo, para a falta de curto-circuito de espiras do estator no ponto de operação 2 (vide 5.5), as frequências mais sensibilizadas pela BR foram próximas ao 1000 Hz, e pelo sensor de campo por indução, foram acima de 1700 Hz. O que comprova que um sensor pode colaborar com o outro para a detecção da falta. Pelos resultados obtidos em laboratório, a maioria das frequências detectadas pela BR estavam abaixo de 1200 Hz.

Em relação aos resultados com a bobina de Rogowski instalada na usina hidrelétrica de Itá, não se consegue afirmar algo conclusivo. As alterações verificadas foram atribuídas a mudanças nos pontos de operação da máquina e aleatoriedades no sistema de medição.

Devido às dificuldades para compreender com clareza as alterações no espectro de frequência causadas pelos variados tipos de falta em diversos pontos de operação, sugere-se criar um banco de dados para poder fazer um levantamento de quais harmônicas mais se sensibilizam em cada tipo de falta e “treinar” um algoritmo de redes neurais. Esse banco de dados pode ser aumentado realizando mais ensaios na bancada de laboratório. Por fim, sugere-se a implementação de um *software* com inteligência artificial para realizar prognósticos e diagnósticos de forma automatizada visando diminuir a ocorrência de falsos positivos e erros humanos.

REFERÊNCIAS

TAVNER, P. et al. **Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines**. Eds Londres, Institution of Engineering and Technology, 2008.

DOS SANTOS, H. F. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo**. Dissertação de mestrado, UFSC, 2016.

RIGONI, M. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo**. Tese de doutorado, UFSC, 2014.

DOS SANTOS, H. F. et al. **Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 16, No. 1, Março 2017.

HEIER, S. **Wind Energy Conversion Systems**. Wiley & Sons, England, 1996.

RAGNEV, W. **Estudo de potência reativa, tensão contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na grande São Paulo**. Dissertação de Mestrado, UFU, 2005.

SOUSA, T. **Estudo de planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência**. Dissertação de mestrado, EESC-USP, 2003.

IRIS POWER. **Motor Hidro online monitoring**. [S.l], 2019.

Disponível em: http://www.irispower.com/motor_cm_FluxTraeII-S.aspx

Acesso em: Dezembro de 2019.

STONE, G. et al. **Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts**. Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE. 2012.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia estática e quase estática**. 3a Edição. Editora UFSC, 2008.

DOS SANTOS, T. L. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para medição de corrente.** Dissertação de mestrado UFSC, 2010.

OATES, C., **The Design and use of Rogowski coils in. Proc. Measurement.** Techniques for Power Electronics, IEE Colloquium on, pp. 5/1 – 5/5, 1991.

EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA. **Manual geral de instruções: Grupo gerador especial,** 2014.

HESSMAN, G. P. **Sistema automatizada para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada.** Trabalho de conclusão de curso, UFSC, 2018.

FREITAS, L. M. **Emprego de Nova Técnica na Detecção de Falta Incipiente em Gerador Síncrono através do Campo Magnético Externado.** SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019, Belo Horizonte/MG. Anais de Congresso XXV SNPTEE, v. 1. p. 1-11, 2019.