



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Luciano Bortoloto Antunes

**ESTRATÉGIAS PARA DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES
SÍNCRONOS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO**

Florianópolis
2023

Luciano Bortoloto Antunes

**ESTRATÉGIAS PARA DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES
SÍNCRONOS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO**

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

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievitz, Dr.

Florianópolis

2023

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

Antunes, Luciano Bortoloto
Estratégias para detecção de faltas incipientes em geradores síncronos através do fluxo magnético no entreferro / Luciano Bortoloto Antunes ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, 2023.
116 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Gerador síncrono. 3. Detecção de faltas incipientes. 4. Fluxo magnético no entreferro. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Wengerkievicz, Carlos Alexandre Corrêa. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Luciano Bortoloto Antunes

**Estratégias para Detecção de Falhas Incipientes em Geradores Síncronos através
do Fluxo Magnético no Entreferro**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Sandro Carlos Lima, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Eng. Eletric. Gustavo Felipe Martin Nascimento, Dr.

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Santa Catarina (SENAI/SC)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Orientador

Eng. Eletric. Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, Dr.

Coorientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo suporte e apoio prestados durante estes anos de dedicação ao mestrado.

Aos meus companheiros e amigos do GRUCAD, que auxiliaram com a realização dos longos ensaios experimentais e contribuíram com discussões para enriquecimento do presente trabalho.

Ao orientador, professor Nelson Jhoe Batistela, e ao coorientador, Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievich, pelo auxílio e instrução dedicados ao longo da realização de toda essa dissertação de mestrado. A gratidão se estende também aos demais professores do GRUCAD que contribuíram, seja de maneira direta ou indireta, para realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro prestado à execução deste trabalho.

Às empresas ENGIE Brasil Energia S.A. e Itá Energética S.A., pelo financiamento parcial deste trabalho através do projeto de PD-00403-0048/2019 realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

“Importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer, 1851)

RESUMO

A parada não programada de um gerador síncrono em operação no sistema elétrico pode ocasionar perda de faturamento e de confiabilidade, além de gerar multas. Neste contexto, sistemas de monitoramento de condição de máquina são uma solução atraente, pois permitem a programação de manutenções preventivas de maneira otimizada. Este trabalho tem como objetivo propor estratégias de análises no domínio do tempo e da frequência para detecção e diferenciação de faltas incipientes em geradores síncronos através do fluxo magnético no entreferro e da corrente de excitação. Realizaram-se ensaios experimentais em uma bancada que permite a imposição de faltas de maneira controlada, aplicando as estratégias propostas. A robustez das estratégias de detecção foi avaliada nos testes com imposição de diferentes modos de falta em diversos pontos de operação na bancada. A análise de diferentes indicadores propostos mostrou a possibilidade de detectar, mensurar e diferenciar os defeitos em enrolamentos do estator e de excitação, bem como de excentricidade estática, independentemente do carregamento da máquina.

Palavras-chave: Gerador síncrono, detecção de faltas incipientes, fluxo magnético no entreferro, corrente de excitação, ponto de operação.

ABSTRACT

The unscheduled stoppage of a synchronous generator operating in the electrical system may cause fines and loss of revenue and reliability. In this context, machine condition monitoring systems are an attractive solution, as they allow the scheduling of preventive maintenance in an optimized way. This work proposes analysis strategies in the time and frequency domain for detecting and differentiating incipient faults in synchronous generators through the air gap magnetic flux and the field current. Experimental tests were made on a bench that allows the imposition of faults in a controlled manner. The robustness of the detection strategies was evaluated in tests with the imposition of different fault modes at different operation points on the bench. The analysis of different proposed indicators showed the possibility of detecting, measuring and differentiating faults in the stator and excitation windings and static eccentricity, regardless of machine loading.

Keywords: Synchronous generator, incipient fault detection, air gap magnetic flux, field current, operation point.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estator de um gerador síncrono trifásico refrigerado a ar de 100 MVA em construção.....	21
Figura 2 – Rotor de (a) polos salientes, (b) polos lisos.	21
Figura 3 – Aspectos construtivos de um gerador síncrono.....	22
Figura 4 – Gerador síncrono, (a) circuito equivalente e (b) diagrama fasorial.....	23
Figura 5 – Curva de capacidade de um gerador síncrono de polos salientes.	24
Figura 6 – Ocorrência de um curto-circuito de espiras no estator.	26
Figura 7 – Consequências do curto-circuito entre espiras no estator de um motor de indução trifásico, (a) entre espiras de uma fase, (b) entre todas as espiras de um enrolamento de uma fase, (c) entre espiras de uma fase e o núcleo no início da ranhura, (d) entre espiras de uma fase e o núcleo no meio da ranhura, (e) entre espiras na ponta do enrolamento e (f) entre espiras de duas fases.	27
Figura 8 – Ocorrência de um curto-circuito de espiras em um polo do rotor de um gerador de 330 MVA.	29
Figura 9 – Lubrificação excessiva no rolamento I.	30
Figura 10 – Lubrificação excessiva no rolamento II.....	31
Figura 11 – Tipos de excentricidade.	31
Figura 12 – Efeitos do atrito entre estator e rotor, (a) no estator (b) no rotor.	32
Figura 13 – Rotor do motor em falha do estudo de caso.	33
Figura 14 – Ilustração do curto-circuito de chapas no estator.	34
Figura 15 – Barras da gaiola de amortecimento de um polo saliente.	35
Figura 16 – Estator de um gerador síncrono hidráulico com dano no núcleo.	35
Figura 17 – Proporção de faltas em motores de indução, estudo do (a) IEEE e (b) EPRI.	36
Figura 18 – Sensores de vibração da SKF.....	39
Figura 19 – Posição de instalação dos sensores do VibraOne.....	39
Figura 20 – (a) Fluxo magnético no rotor medido pelo equipamento <i>FluxTracII-STM</i> e (b) sensor de fluxo.	40
Figura 21 – Histórico da componente de 302,14 Hz do GS da UHIT de Itá.....	41
Figura 22 – Diagrama polar da (a) máquina sadia (b) com curto-circuito de espiras nos polos 8 e 48.	43

Figura 23 – Método de detecção com sensores defasados de 180° elétricos.....	44
Figura 24 – Gráfico polar do fluxo magnético para máquina sadia, com defeito em um polo do rotor e com excentricidade dinâmica.....	45
Figura 25 – Simulação através do MEF para um gerador síncrono de 8 polos.	47
Figura 26 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada em uma bobina sonda no entreferro, máquina sadia.	48
Figura 27 – Simulação com perda de espiras em um polo do rotor.....	48
Figura 28 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada em uma bobina sonda no entreferro, máquina com polo defeituoso.....	49
Figura 29 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada nas bobinas sondas no entreferro, máquina com excentricidade estática.....	51
Figura 30 – Distribuição de sensores para detecção de excentricidade.	52
Figura 31 – Bobina exploratório ou bobina sonda.....	55
Figura 32 – Bancada de testes.....	57
Figura 33 – Equipamento para inserção <i>online</i> de faltas.....	59
Figura 34 – Esquema para retirada de espiras de um polo do rotor.....	60
Figura 35 – Esquema para retirada de espiras de um polo do estator.	61
Figura 36 – Esquema para excentricidade estática.	62
Figura 37 – Bobinas exploratórias presentes na máquina de 8 polos.....	63
Figura 38 – Conexão gerador, transformador e rede.....	64
Figura 39 – Topologia de um canal do sistema.	65
Figura 40 – Circuito para ajuste da tensão.....	66
Figura 41 – Posicionamento dos sensores de fluxo magnético de entreferro.....	67
Figura 42 – Foto de um ensaio no LABMAQ.	70
Figura 43 – Sinal medido pelos sensores.....	71
Figura 44 – Sinal de fluxo medido.	72
Figura 45 – Operação de rastreamento do espectro.	73
Figura 46 – (a) Cascata de FFTs, (b) histórico da componente.	74
Figura 47 – Fluxo no sensor 0° com e sem falta no rotor, PO fixo.....	75
Figura 48 – Fluxo nos sensores com falta grave no rotor, PO fixo.....	76
Figura 49 – Histórico de amplitudes da DHI_1 , PO fixo.....	76
Figura 50 – DHI_1 , Sensor 0°, potência aparente fixa.	78
Figura 51 – DHI_1 , Sensor 0°, fator de potência fixo.	79
Figura 52 – Média da DHI_1 em função da corrente de excitação.	80

Figura 53 – Regressões lineares e pontos experimentais.	81
Figura 54 – Diagrama para avaliação do defeito de perda de espiras no rotor.	82
Figura 55 – Avaliação dos pontos acrescentando os dos demais sensores.	83
Figura 56 – Fluxo no sensor 0° com e sem excentricidade, PO fixo.	84
Figura 57 – Fluxo no sensor 170° com e sem excentricidade, PO fixo.	85
Figura 58 – Fluxo no sensor 90° com e sem excentricidade, PO fixo.	85
Figura 59 – Fluxo nos sensores com excentricidade, PO fixo.	86
Figura 60 – Histórico do valor eficaz do fluxo medido pelos sensores, PO fixo.	87
Figura 61 – Histórico do valor eficaz dos fluxos normalizados, PO fixo.	88
Figura 62 – Histórico da diferença dos fluxos, PO fixo.	89
Figura 63 – Valor médio do fluxo magnético no eixo vertical para diferentes condições de operação.	89
Figura 64 – Diferença dos fluxos com inserção de deslocamento positivo, potência aparente fixa.	90
Figura 65 – Diferença do fluxo, deslocamento positivo, fator de potência fixo.	91
Figura 66 – Média da diferença dos fluxos em função da corrente de excitação.	92
Figura 67 – Diagrama para avaliação do defeito de excentricidade estática.	94
Figura 68 – Diagrama para avaliação do defeito de excentricidade estática com pontos experimentais.	95
Figura 69 – Fluxo no sensor 0° com e sem falta na fase A, PO fixo.	96
Figura 70 – Fluxo nos sensores com falta moderada na fase A, PO fixo.	96
Figura 71 – FFT máquina sadia e máquina com falta no estator.	97
Figura 72 – DHIs do sinal captado pelo sensor 0° com e sem falta na fase A, PO fixo.	98
Figura 73 – DHI ₃ no sensor 0°, falta fase A, potência aparente fixa.	99
Figura 74 – DHI ₃ , sensor 0°, PO fixo, variação da fase sob falta.	100
Figura 75 – DHI ₃ nos quatro sensores, falta fase A, PO fixo.	100
Figura 76 – Médias da DHI ₃ do sinal de cada sensor em função da corrente de excitação, falta fase A.	101
Figura 77 – Médias da DHI ₃ dos sinais dos quatro sensores em função da corrente de excitação.	102
Figura 78 – Diferenciação de perda de espiras no rotor de excentricidade estática ..	104

Figura 79 – Diferenciação de perda de espiras no rotor de perda de espiras no estator.	104
Figura 80 – Diferenciação de excentricidade estática de perda de espiras no rotor.	105
Figura 81 – Diferenciação entre excentricidade estática e perda de espiras no estator.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Parâmetros das máquinas elétricas da bancada de testes.	58
Tabela II – Comparação sistema de medição antigo e novo.	65
Tabela III – Pontos de operação dos ensaios realizados.....	68
Tabela IV – Ensaio de imposição de falta.....	69
Tabela V – Valores de R^2 das regressões lineares da Figura 52.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GS Gerador Síncrono

SIN Sistema Interligado Nacional

EPE Empresa de Pesquisa Energética

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

EPRI Electric Power Research Institute

GRUCAD Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos

MEF Método de Elementos Finitos

FFT Fast Fourier Transform

LABMAQ Laboratório de Máquinas Elétricas

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

DHI Distorção Harmônica Individual

PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

LA Lado Acoplado

LNA Lado Não Acoplado

CMRR Common Mode Rejection Ratio

NI National Instruments

PO Ponto de Operação

FP Fator de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	MÁQUINA SÍNCRONA E FALTAS INCIPIENTES.....	20
2.1	A MÁQUINA SÍNCRONA	20
2.2	AS FALTAS INCIPIENTES	25
2.2.1	Defeitos no Enrolamento de Armadura	25
2.2.2	Defeitos no Enrolamento de Excitação.....	28
2.2.3	Defeitos no Rolamento.....	30
2.2.4	Outros Defeitos Incipientes.....	33
2.2.5	Proporção de Ocorrência dos Defeitos.....	36
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	37
3	ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES	38
3.1	EQUIPAMENTOS COMERCIAIS DE DETECÇÃO DE FALTAS	38
3.2	ESTADO DA ARTE NA ÁREA DE DETECÇÃO DE FALTAS	42
3.2.1	Enrolamento do Rotor	42
3.2.2	Excentricidades.....	44
3.2.3	Enrolamento do Estator	45
3.3	ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO APLICADAS	46
3.3.1	Perda de Espiras no Enrolamento de Excitação.....	46
3.3.2	Excentricidade Estática	51
3.3.3	Perda de Espiras no Enrolamento de Armadura	53
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	54

4	APARATO EXPERIMENTAL E ENSAIOS REALIZADOS	55
4.1	OS SENSORES DE FLUXO MAGNÉTICO DE ENTREFERRO	55
4.2	BANCADA DE TESTES	56
4.3	DISPOSITIVO DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	64
4.4	METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS	67
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	70
5	ANÁLISES E RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO	71
5.1	CONSTRUÇÃO DOS HISTÓRICOS DE AMPLITUDES	71
5.2	DETECÇÃO DE PERDA DE ESPIRAS EM POLO DO ROTOR	74
5.3	DETECÇÃO DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA.....	83
5.4	DETECÇÃO DE PERDA DE ESPIRAS EM POLO DO ESTATOR.....	95
5.5	APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS NA DIFERENCIAÇÃO DAS FALTAS	103
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	106
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	108
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

O Gerador Síncrono (GS) é um dispositivo eletromecânico de grande importância para o Sistema Interligado Nacional (SIN), visto que é o principal agente responsável pela conversão eletromecânica de energia em usinas hidrelétricas e termelétricas. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (ENERGÉTICA, 2021), referente ao ano de 2020, mais de 60% da geração de energia elétrica proveio de hidrelétricas, e mais de 20% de termelétricas. Isso demonstra o papel fundamental da máquina síncrona na geração de energia elétrica no país.

Neste contexto das máquinas de grande potência, a parada não programada de um gerador em operação no sistema elétrico pode ocasionar a interrupção no fornecimento de energia elétrica para a população. Esse corte de energia não programado tem como consequências a perda de faturamento e a aplicação de multas para a concessionária, além da perda de confiabilidade do sistema elétrico. Por essa razão, sistemas de monitoramento de condição de máquina são de grande importância, pois permitem a realização de manutenções preditivas, ou seja, ações de manutenção apenas quando há indícios de evolução de uma falta.

O monitoramento da condição da máquina pode ser realizado com base em diferentes grandezas, sejam elétricas ou mecânicas. No âmbito dos motores de indução, a detecção de faltas de rotor através do monitoramento da corrente de alimentação, com uso de redes neurais, já data do século passado (FILIPPETTI, 1993). Outra grandeza, explorada para motores de indução e geradores síncronos, é a vibração mecânica, a qual já possui normas reguladoras, como a ISO 20816-1, para detecção de faltas mecânicas. O trabalho de Nadarajan (2015) mostra que é possível também realizar a detecção de faltas no estator através da vibração mecânica.

Técnicas de detecção de defeitos através do monitoramento do fluxo magnético são abordadas nos trabalhos de Iamamura (2011) e Santos (2021). O primeiro trabalho aborda a detecção e diferenciação de faltas de rotor através de sensores de fluxo magnético no entreferro, ao passo que o segundo engloba faltas de rotor e de estator com o uso de sensores de fluxo magnético posicionados no exterior da máquina. A utilização de sensores no interior da máquina rotativa caracteriza um método invasivo, visto que demanda o desmonte de partes do gerador para instalação dos transdutores. Entretanto, possui vantagens em relação aos sensores de fluxo externo, pois os sinais medidos são de maior amplitude e menos suscetíveis a ruídos externos (VITEK, 2004).

Como mostrado por Iamamura (2011), a detecção e diferenciação de faltas de rotor através de sensores de fluxo magnético no entreferro já possui uma base sólida, entretanto, a

mensuração da gravidade do defeito e a robustez das técnicas a variações do ponto de operação da máquina constituem pontos em aberto. A detecção de faltas no estator com base no fluxo magnético também é um tema pendente. É então nesse contexto que o presente trabalho se insere.

Esta dissertação está inserida no âmbito dos programas de P&D da Engie Brasil Energia, da Itá Energética S.A. e do programa de P&D Aneel, por meio do projeto PD-00403-0048/2019, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”. Este projeto foi realizado também em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A. O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) também custeou parcialmente este trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral, que expõe a meta geral do trabalho, e os objetivos específicos, os quais contém os passos para execução desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é investigar, desenvolver e aplicar estratégias para detecção de faltas incipientes em geradores síncronos com base na medição do fluxo magnético no entreferro.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para este trabalho são:

- Estudar e atualizar conhecimentos sobre detecção de faltas incipientes em geradores síncronos;
- Estudar e compreender o funcionamento e operação da bancada de imposição de faltas incipientes disponível na UFSC;
- Adequar um sistema para medição e aquisição de sinais provenientes de sensores;
- Realizar ensaios de imposição de faltas em bancada;
- Avaliar o comportamento do fluxo magnético interno em diferentes pontos de operação e condições de falta;

- Aplicar técnicas de análise nos domínios do tempo e da frequência para a detecção de faltas incipientes;
- Propor, analisar e comparar desempenhos de diferentes indicadores e técnicas de análise;
- Documentar e publicar resultados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Após este primeiro capítulo introdutório, o capítulo 2 aborda uma revisão da literatura sobre geradores síncronos e faltas incipientes. O capítulo 3 apresenta equipamentos comerciais de detecção de defeitos, aborda trabalhos acadêmicos sobre o tema e descreve as estratégias aplicadas neste trabalho.

O capítulo 4 apresenta a metodologia de coleta dos dados experimentais. Nele são apresentados os sensores de fluxo magnético de entreferro, a bancada de ensaios, o equipamento de medição de sinais e a metodologia utilizada durante os experimentos. Em seguida, no capítulo 5, realiza-se a análise dos dados obtidos experimentalmente e apresentam-se os resultados da aplicação das estratégias de detecção dos defeitos de perda de espiras em um polo do rotor, de excentricidade estática e de perda de espiras no enrolamento de armadura.

Para finalizar, o capítulo 6 aborda as principais conclusões obtidas por este trabalho e sugere perspectivas para futuras investigações e projetos de desenvolvimento nesta área.

2 MÁQUINA SÍNCRONA E FALTAS INCIPIENTES

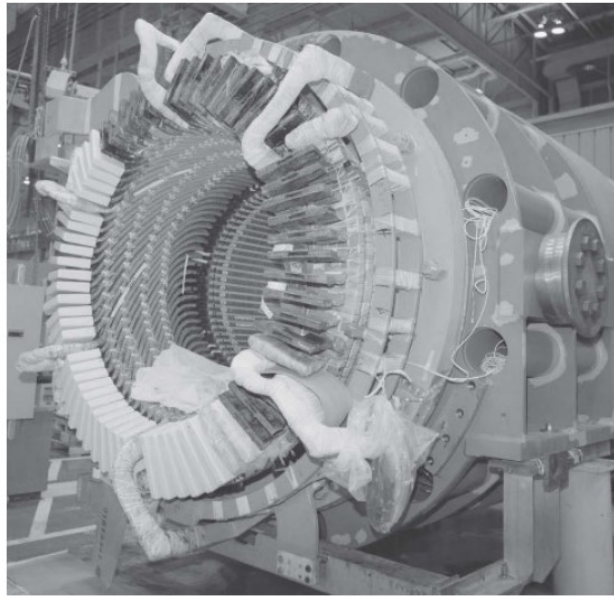
Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre a máquina síncrona e uma descrição sobre os principais tipos de faltas incipientes.

2.1 A MÁQUINA SÍNCRONA

Uma máquina síncrona é caracterizada pela presença de dois enrolamentos: o de armadura e o de excitação. O enrolamento de armadura é comumente alojado no estator, e por ele fluem correntes alternadas, as quais são trifásicas nos geradores conectados à rede elétrica. A excitação da máquina no rotor é constituída de um enrolamento alimentado por corrente contínua ou através de ímãs permanentes (FITZGERALD, 2014).

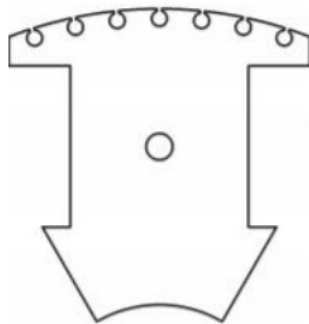
O estator corresponde à parte estática da máquina elétrica, e o rotor, ao componente rotativo. Ambos, estator e rotor, são separados por uma região nomeada entreferro, a qual é comumente preenchida por ar e possui a menor espessura possível, visando minimizar a corrente de magnetização necessária para atingir o fluxo magnético desejado. O núcleo do estator é composto de um pacote de lâminas de material ferromagnético para minimizar a circulação de correntes induzidas (correntes de Foucault) e gerar uma indução magnética elevada no entreferro da máquina. O rotor pode ser de polos salientes ou de polos lisos. A construção com polos lisos é usada para turbogeradores de dois a quatro polos, já a construção com polos salientes é melhor adaptada a geradores multipolares hidrelétricos de baixa velocidade (FITZGERALD, 2014). A Figura 1 mostra a foto de um estator de um gerador síncrono trifásico de 100 MVA com refrigeração a ar em construção. A Figura 2 (a) apresenta, conceitualmente e na prática, um polo de uma máquina síncrona de polos salientes, enquanto a Figura 2 (b) mostra um rotor de polos lisos.

Figura 1 – Estator de um gerador síncrono trifásico refrigerado a ar de 100 MVA em construção.

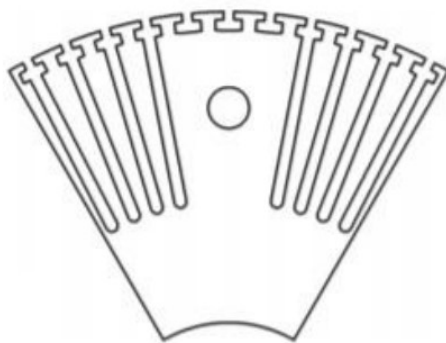


Fonte: Fitzgerald (2014).

Figura 2 – Rotor de (a) polos salientes, (b) polos lisos.



(a)



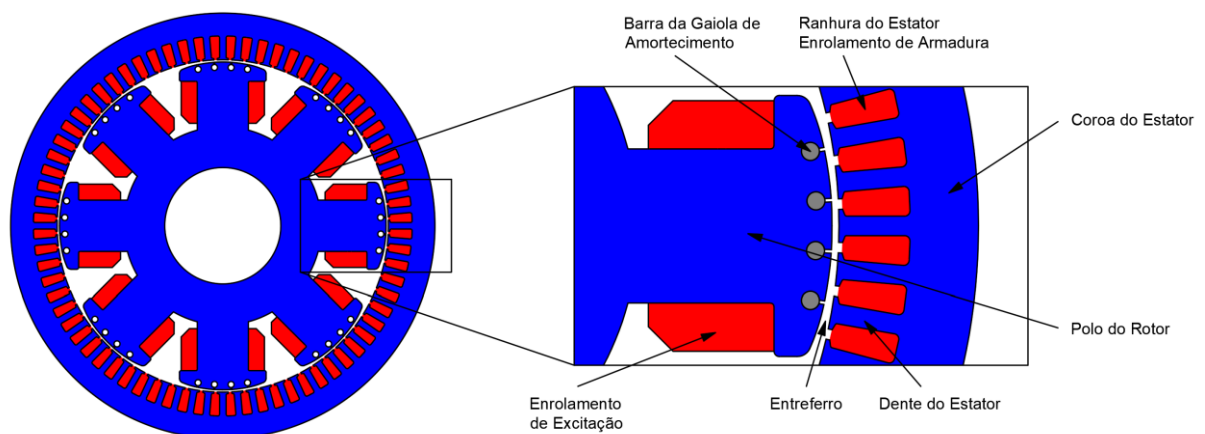
(b)

Fonte: Kutt (2020).

Como é possível inferir da Figura 2, o tamanho do entreferro em máquinas cujo rotor é de polos salientes não é constante ao longo da circunferência interna do estator, ao contrário do rotor cilíndrico (polos lisos). Além disso, a operação em altas velocidades com rotor de polos salientes não é recomendada, pela possibilidade de problemas mecânicos de fixação desses polos junto ao rotor. No pior dos casos, um dos polos do rotor poderia se desacoplar e colidir com o estator da própria máquina, causando assim grandes avarias, ou até perda total da máquina elétrica rotativa.

A Figura 3 ilustra um corte transversal de um gerador síncrono de oito polos salientes de 10 kVA apontando seus principais aspectos construtivos. Observa-se que o enrolamento de armadura da máquina é alojado em ranhuras construídas no estator, ao passo que o enrolamento de campo reside nos polos do rotor. As linhas de fluxo magnético provenientes de um polo do rotor atravessam o entreferro da máquina e são, majoritariamente, concentradas nos dentes do estator (por se tratar de um material ferromagnético) e se fecham com os polos adjacentes através da coroa do estator. A presença de barras metálicas no rotor tem o intuito de formar a gaiola de amortecimento, a qual tem como objetivo amenizar o efeito de transitórios (sejam eletromagnéticos ou mecânicos) que possam levar a perda de sincronismo do gerador (FITZGERALD, 2014).

Figura 3 – Aspectos construtivos de um gerador síncrono.



Fonte: Autor.

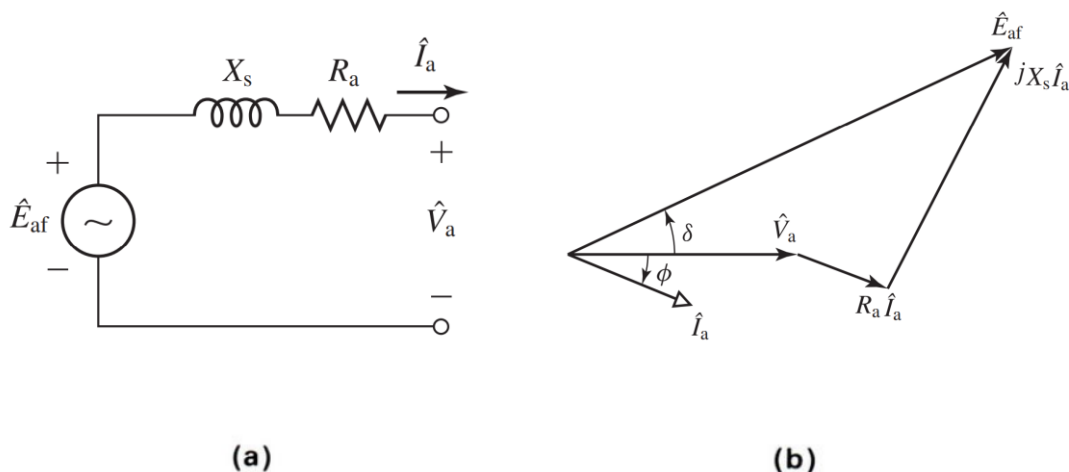
A frequência de rotação (f_{mec}), a frequência elétrica das correntes da armadura (f_{el}) e o número de polos (p) de uma máquina síncrona relacionam-se através de (2.1). Máquinas com um menor número de polos têm uma frequência mecânica maior, ou seja, possuem uma

velocidade de rotação maior para a mesma frequência elétrica. No caso limite de uma máquina de dois polos, a frequência de rotação é idêntica à frequência elétrica.

$$f_{mec} = \frac{2}{p} \cdot f_{el} \quad (2.1)$$

Quando opera na condição de gerador, a máquina síncrona atua como uma fonte de tensão controlada pela velocidade e pela corrente de excitação. A frequência desta fonte de tensão é determinada pela velocidade do seu acionador mecânico primário (máquina motriz ou máquina primária). Quando um gerador síncrono é conectado a um sistema interligado, contendo outros geradores em paralelo, a tensão e a frequência em seus terminais de armadura são determinadas de modo substancial pelo sistema. A tensão interna (E_{af}) produzida pela máquina difere-se da tensão terminal (V_a) principalmente pelos efeitos da resistência de armadura (R_a) e da reatância síncrona (X_s), como representa o circuito equivalente (no domínio fasorial) da Figura 2 (a) para uma máquina de polos lisos operando em regime permanente. A transferência de potência ativa é determinada pelo ângulo entre a tensão interna e a tensão terminal, nomeado de ângulo de carga (δ). Se a tensão interna está adiantada em relação a terminal, como mostrado no diagrama fasorial da Figura 4 (b), a máquina opera como gerador, se estiver atrasada, como motor (FITZGERALD, 2014).

Figura 4 – Gerador síncrono, (a) circuito equivalente e (b) diagrama fasorial.



Fonte: Adaptado de Fitzgerald (2014).

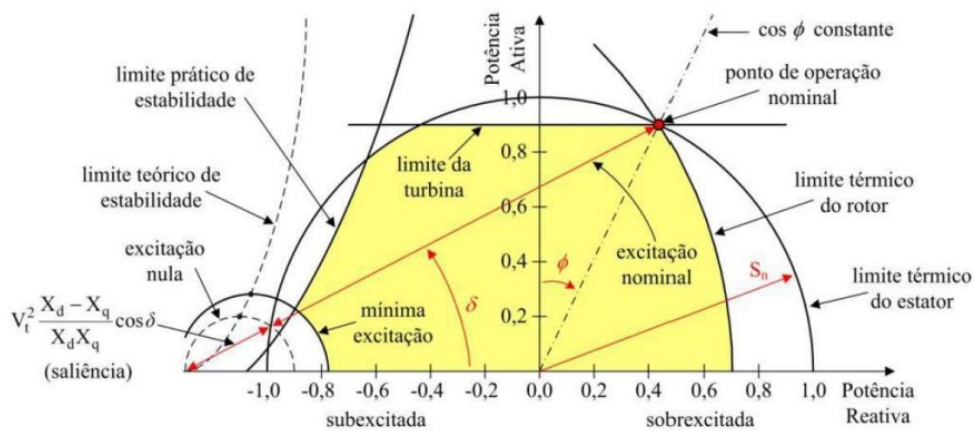
Na condição que o sistema interligado seja de grande porte, ou seja, manipule uma potência aparente muito superior à do gerador sincronizado, diz-se que o gerador é conectado a uma barra infinita. Nesta ocasião, a frequência e a tensão nos terminais do gerador são fixas,

e o operador pode apenas controlar as potências ativa e reativa fornecidas pela máquina (FALCONE, 2002). Em uma barra infinita, o controle das potências ativa e reativa se dá, respectivamente, através do conjugado da máquina primária e da magnitude da corrente de excitação.

No caso de geradores com ímãs permanentes, o controle da potência reativa não é possível de forma independente, e na aplicação como gerador isolado, a tensão terminal da máquina é determinada pela carga. Por estes motivos, máquinas a ímãs permanentes são majoritariamente utilizadas como motores (FITZGERALD, 2014). Neste trabalho será abordado apenas máquinas que possuem o enrolamento de campo alimentado por corrente.

A carta de potência, também conhecida como curva de capacidade, é um diagrama que permite ao operador verificar se a máquina está operando dentro de seus limites operacionais e de estabilidade. A Figura 5 mostra a curva de capacidade clássica de um gerador síncrono de polos salientes, onde a região segura é mostrada em amarelo (hachurada).

Figura 5 – Curva de capacidade de um gerador síncrono de polos salientes.



Fonte: Guimarães (2006).

O limite da turbina, indicado pela reta horizontal na parte superior, é definido pela máquina primária, ou seja, trata-se da maior potência ativa que a máquina motriz pode fornecer ao eixo do gerador. O limite térmico do estator, expresso como um semicírculo, é definido pela corrente nominal dos condutores do enrolamento da armadura, considerando-se a operação em tensão nominal. O limite térmico do rotor, indicado pelo arco no semiplano direito da Figura 5, é definido pela corrente nominal dos condutores do enrolamento de excitação. O limite de estabilidade e a excitação mínima são definidos pelos máximos ângulos de carga que previnem a perda de sincronismo do gerador.

Na Figura 5, observa-se também uma nomenclatura muito utilizada para máquinas síncronas. Quando o módulo da tensão interna do gerador é menor que sua tensão terminal diz-se que o gerador está subexcitado (absorvendo potência reativa), e quando a tensão interna é maior que a terminal, diz-se que o gerador está superexcitado ou sobreexcitado (fornecendo potência reativa).

2.2 AS FALTAS INCIPIENTES

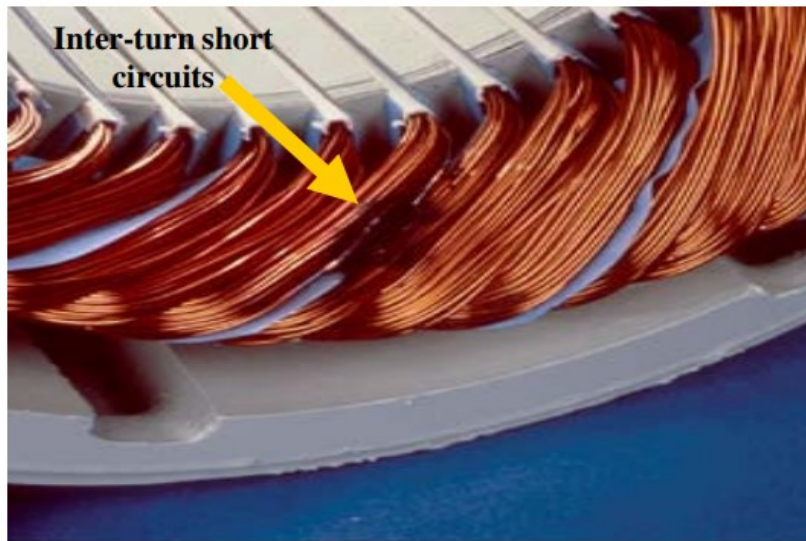
Uma vez conhecido o personagem principal (gerador síncrono) é necessário reconhecer também os vilões da história, as faltas incipientes. A presente seção tem então como objetivo apresentar os principais tipos de defeitos, realçando suas causas e consequências.

2.2.1 Defeitos no Enrolamento de Armadura

A vasta maioria das faltas no enrolamento de armadura consistem de perda ou curto-circuito de espiras. Este defeito é geralmente ocasionado pela falha no isolamento ou pelo rompimento dos condutores, os quais podem ser provenientes de problemas elétricos, térmicos e/ou mecânicos (SAHRAOUI, 2006).

O surgimento de tensões elevadas, devido à transitórios eletromagnéticos, pode gerar descargas elétricas que danificam o isolamento dos condutores, provocando assim a falta através de um problema de natureza elétrica. A operação prolongada da máquina elétrica em regime de sobrecarga produz um sobreaquecimento dos condutores, levando ao derretimento do isolamento e ocasionando o defeito através de efeitos térmicos. A vibração mecânica excessiva em uma máquina rotativa também pode levar ao surgimento da falta, visto que os condutores podem sofrer fricção dentro das ranhuras do estator. Com o tempo, esse atrito com o núcleo pode ocasionar o rompimento do isolante, ou até a quebra total dos condutores (GRUBIC, 2008). A Figura 6 mostra a ocorrência de um curto-circuito entre espiras no enrolamento de armadura no estator de um motor de indução. Observa-se que nas redondezas do local da falta há condutores carbonizados.

Figura 6 – Ocorrência de um curto-circuito de espiras no estator.

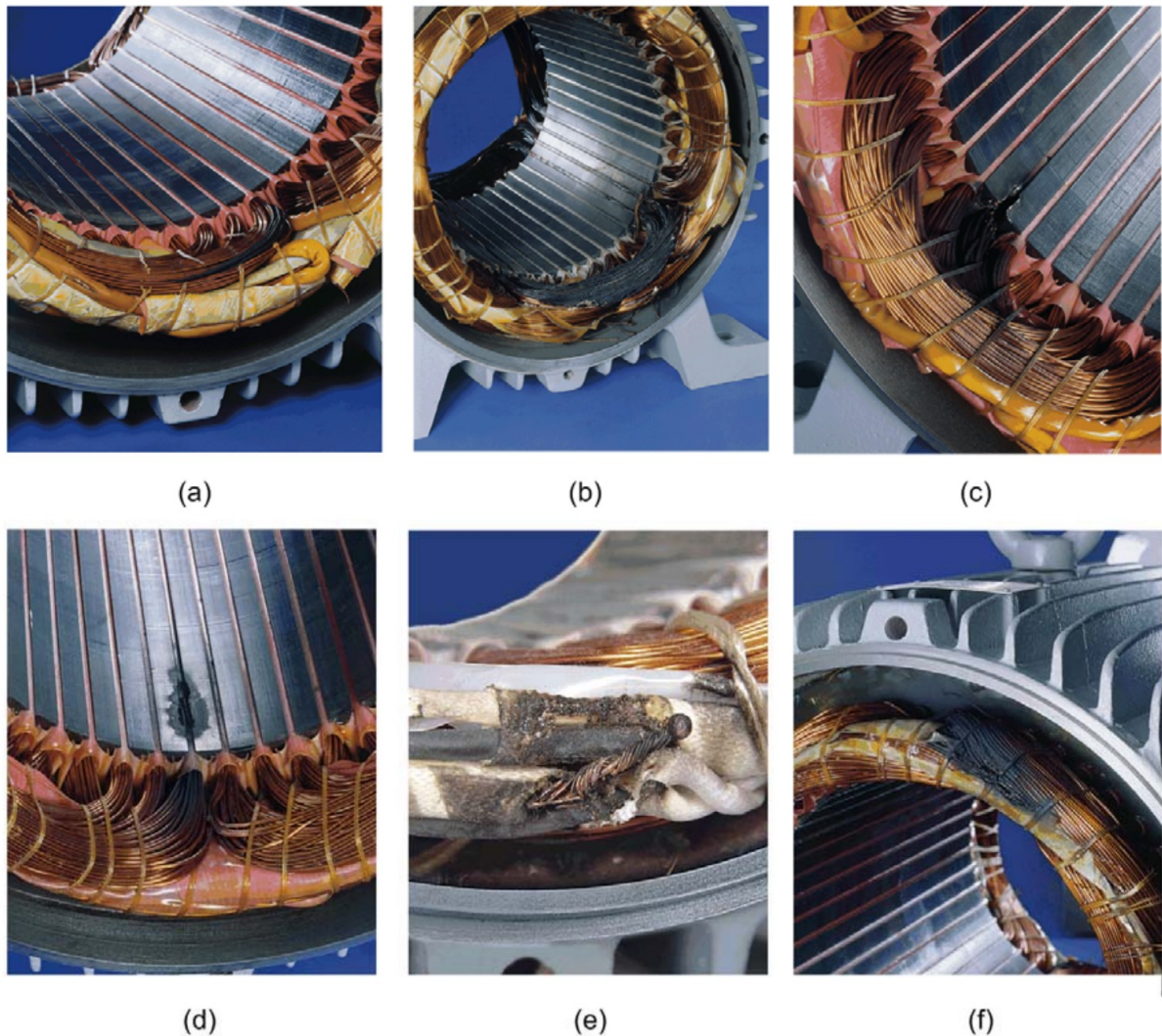


Fonte: Sahraoui (2006).

Como o enrolamento de armadura em máquinas de maior potência é normalmente trifásico, pode-se ter um curto-circuito entre espiras de uma mesma fase, entre duas fases, entre três fases e de quaisquer fases com o núcleo (SILVA, 2006). A Figura 7 mostra, para o estator de um motor de indução trifásico, as consequências de um curto-circuito entre espiras (a) de uma mesma fase, (b) do enrolamento inteiro de uma fase, (c) de uma fase com o núcleo no começo da ranhura, (d) de uma fase com o núcleo no meio da ranhura, (e) nas pontas do enrolamento e (f) de duas fases. Nota-se que em todos os casos há a presença de um grande número de condutores carbonizados, principalmente nos casos da Figura 7 (b) e (f).

Os curtos-circuitos envolvendo mais de uma fase são extremamente severos, já que essencialmente há um curto-circuito bifásico ou trifásico no interior da máquina. O curto-circuito entre espiras de uma fase com o núcleo consiste de um curto-circuito monofásico à terra, pois a carcaça e o núcleo são normalmente aterrados, e é o tipo de curto-circuito mais grave para motores de indução trifásicos (GRUBIC, 2008). O curto-circuito entre espiras de uma mesma fase não produz corrente de circulação com a terra nem entre fase-fase, porém gera um aumento da corrente na localidade da falta. A perda de espiras não ocasiona um aumento expressivo das correntes na região do defeito e nem produz circulação com a terra ou entre fases. Todavia, assim como nos casos anteriores, ela gera um desbalanceamento de carga entre as fases. Assim, no enrolamento de armadura, os curtos-circuitos entre espiras de fases distintas, ou com o núcleo, representam os defeitos mais severos, seguidos pelo curto-circuito entre espiras de uma mesma fase e por último a perda de espiras.

Figura 7 – Consequências do curto-circuito entre espiras no estator de um motor de indução trifásico, (a) entre espiras de uma fase, (b) entre todas as espiras de um enrolamento de uma fase, (c) entre espiras de uma fase e o núcleo no início da ranhura, (d) entre espiras de uma fase e o núcleo no meio da ranhura, (e) entre espiras na ponta do enrolamento e (f) entre espiras de duas fases.



Fonte: WEG (2019).

O agravamento destes defeitos ocorre pelo aumento da corrente que atravessa as espiras curto-circuitadas, pois isso produz um aumento de temperatura, por efeito Joule, nos condutores. Essa elevação da temperatura, nas redondezas da falta, induz uma falha no isolamento dos condutores que estão nas proximidades do defeito, e assim mais espiras ficam em curto-circuito, repetindo então o processo.

Para motores e geradores isolados, não conectados à terra, a perda e o curto-circuito de espiras no enrolamento de armadura possuem também como consequência um desbalanceamento das tensões, pois, pela Lei de Faraday-Lenz, tem-se uma redução da tensão induzida, ocasionada por uma diminuição do número de espiras. Entretanto, para um gerador

síncrono operando em sincronismo com a rede elétrica (conectado a uma barra infinita), a tensão nos seus terminais é fixa, ditada pelo sistema. Desta maneira, o problema se torna, majoritariamente, um desbalanceamento das correntes de armadura (YAGHOBI, 2013).

De maneira geral, defeitos no enrolamento de armadura ocasionam problemas graves, como o aumento e desbalanceamento das correntes. Além disso, o processo de agravamento do defeito é rápido, em razão das amplitudes das correntes que atravessam este enrolamento serem muito elevadas, quando comparadas aos valores nominais da corrente do enrolamento de campo, levando a um sobreaquecimento excessivo no local (BOSSIO, 2011).

2.2.2 Defeitos no Enrolamento de Excitação

Assim como no caso do enrolamento de armadura, os principais defeitos atrelados ao enrolamento de campo são o curto-circuito e a perda de espiras, novamente ocasionados pela falha do isolamento e/ou pelo rompimento dos condutores. Porém, este caso se diferencia bastante do anterior por três motivos principais. São eles: corrente contínua, menor magnitude e rotação. A corrente que circula no enrolamento de excitação de um gerador síncrono é contínua e possui magnitude inferior ao das correntes trifásicas do enrolamento de armadura, pois ela é empregada para a excitação da máquina e para o controle de compensação da potência reativa solicitada pela carga. Além disso, a alimentação deste enrolamento chega até o rotor, geralmente, através de escovas de carbono, visto que o rotor se encontra em rotação durante a operação do gerador. A Figura 8 mostra um curto-circuito de espiras em um polo do rotor de um gerador síncrono de 330 MVA. Diferentemente dos casos do enrolamento de armadura, não é possível ver a presença de carbonização nos condutores.

Assim como no enrolamento de armadura, o surgimento deste tipo de falta pode ocorrer por condições anormais de natureza elétrica, térmica ou mecânica. Apesar do nível de corrente no enrolamento de campo ser inferior ao de armadura, estresses elétricos podem ocorrer devido às escovas condutoras ou a chaveamentos de componentes eletrônicos na retificação, os quais provocam picos de tensões no enrolamento (SHAIKH, 2022). O sobreaquecimento e a vibração excessiva correspondem, novamente, a problemas de natureza térmica e mecânica, respectivamente. Como o rotor se encontra girando, há também o problema do estresse provocado por forças centrífugas que deterioram a condição de fixação das espiras junto aos polos, principalmente na operação de partida e parada da máquina (STONE, 2011).

Figura 8 – Ocorrência de um curto-circuito de espiras em um polo do rotor de um gerador de 330 MVA.



Fonte: Shaikh (2022).

Em relação ao agravamento da falta, esse dependerá da natureza da causa do defeito. Isso porque a corrente que circula no enrolamento de excitação é de baixa magnitude se comparada as da armadura. Então, o processo de sobreaquecimento dos condutores não é tão severo. Assim, o defeito tem dificuldade de se auto propagar.

A principal consequência da perda e do curto-circuito de espiras no enrolamento de excitação de um polo do rotor é a diminuição do fluxo magnético no entreferro. Além disso, essa diminuição ocorre apenas em um semiciclo da forma de onda, relativo àquele polo, provocando assim um desbalanceamento magnético no rotor. Apesar deste defeito não apresentar consequências imediatas na operação da máquina, o agravamento da disparidade das forças magnéticas pode levar a um aumento excessivo da vibração mecânica e também produzir excentricidades dinâmicas (TAVNER, 2007).

Diferentemente do defeito nos enrolamentos do estator, as faltas atreladas ao enrolamento de campo não são tão graves a curto e médio prazo quando comparada às do enrolamento de armadura, entretanto, a negligência para com o defeito pode levar a uma diminuição significativa da vida útil do equipamento (EHYA, 2021).

2.2.3 Defeitos no Rolamento

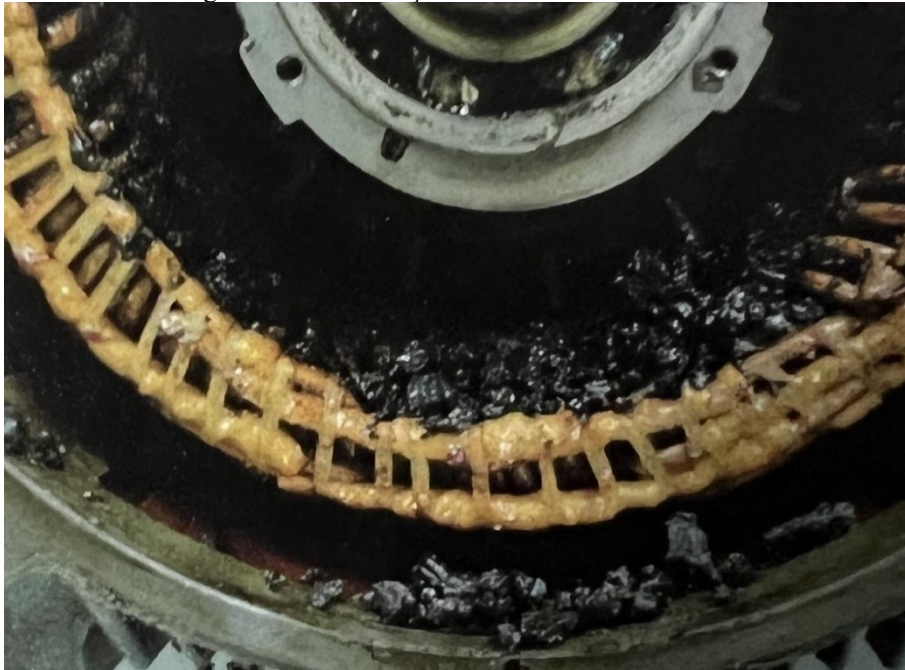
O rolamento de uma máquina rotativa é o componente que realiza a conexão da parte rotativa (rotor) com a parte estática que o suporta (mancal), normalmente assistido por um líquido lubrificante. Seu principal objetivo é permitir que a junção dessas duas partes seja a mais suave e livre de atrito possível, sendo então um dos componentes mecânicos primordiais de uma máquina elétrica rotativa (MISTRY, 2016). As principais causas de defeito e falha no rolamento são: corrosão elétrica, vibração mecânica, instalação imprópria, sobrecarga e lubrificação inadequada (MISTRY, 2016). A Figura 9 e a Figura 10 mostram fotos de máquinas com evidências de falha no rolamento por lubrificação excessiva.

Figura 9 – Lubrificação excessiva no rolamento I.



Fonte: Mistry (2016).

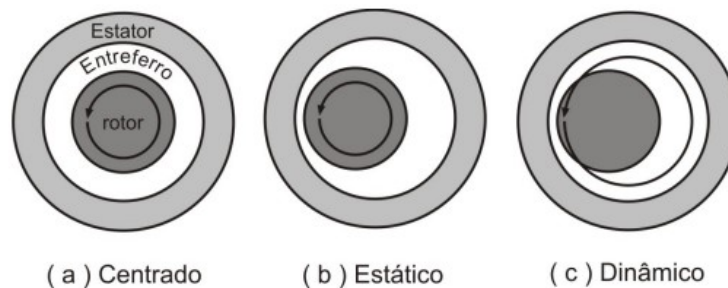
Figura 10 – Lubrificação excessiva no rolamento II.



Fonte: Mistry (2016).

O funcionamento incorreto do rolamento pode ser a causa de vários defeitos de natureza mecânica, como por exemplo: folgas, vibração, desbalanceamentos, excentricidades e desalinhamentos. O defeito de excentricidade, o qual ocorre quando o entreferro deixa de ser uniforme ao longo de todo o pacote estático, pode ser dividido em dois tipos: estático e dinâmico. A excentricidade estática ocorre quando a região de menor entreferro é fixa e não varia no tempo, e geralmente é causada por um desalinhamento entre estator e rotor. No caso da excentricidade dinâmica, a região de menor entreferro varia com o tempo, pois o centro de rotação da máquina não está alinhado com o rotor. A Figura 11 ilustra os tipos de excentricidade citados.

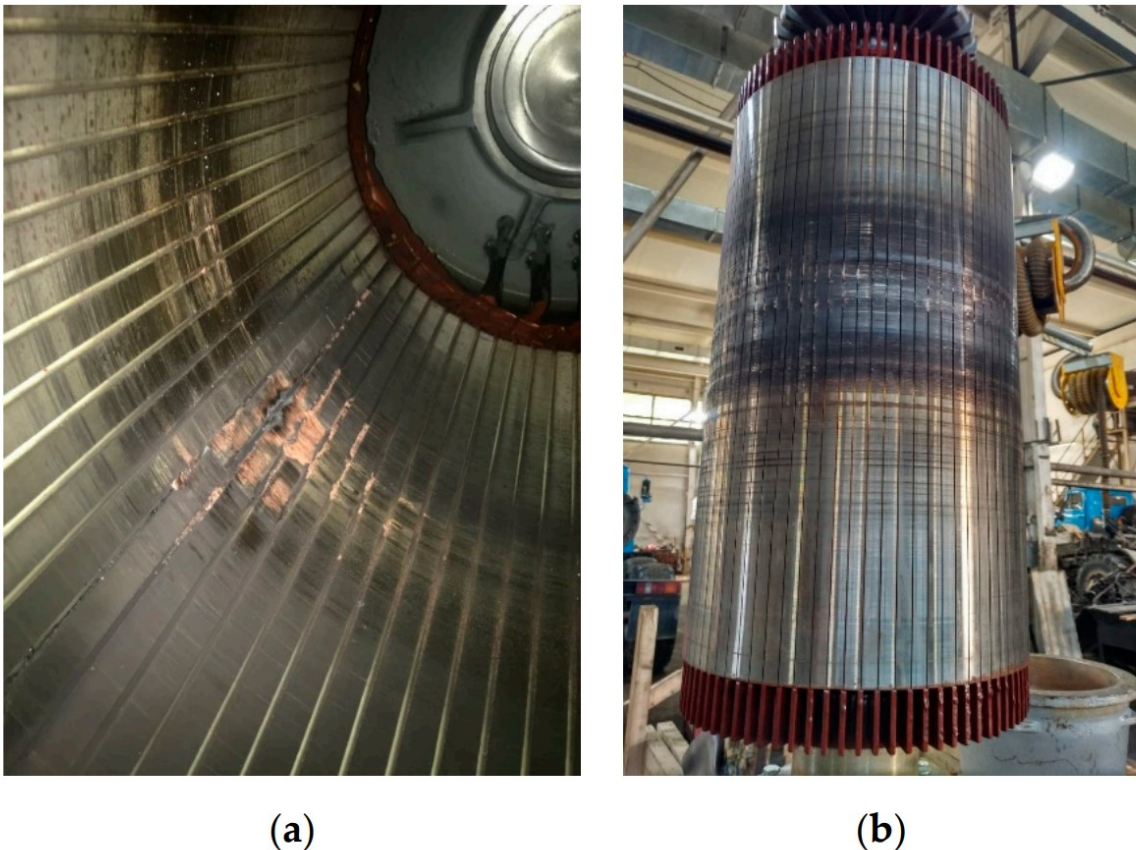
Figura 11 – Tipos de excentricidade.



Fonte: Brito (2001).

A excentricidade provoca um efeito severo de desbalanceamento magnético de atração entre estator e rotor. Em um estágio avançado de excentricidade é possível a ocorrência até de fricção entre estator e rotor, o que pode gerar, no pior dos casos, a perda total do equipamento ou surgimento de outras faltas, como quebra das lâminas do pacote estatórico e curto-circuito ou perda de espiras nos enrolamentos de excitação e de armadura (FROSINI, 2020). A Figura 12 fornece a imagem do (a) estator e (b) do rotor de uma máquina elétrica que sofreu atrito entre estator e rotor devido à excentricidade.

Figura 12 – Efeitos do atrito entre estator e rotor, (a) no estator (b) no rotor.



Fonte: Frosini (2020).

O caso da figura anterior mostrou a consequência do desenvolvimento de uma falta até o estado gravíssimo, o qual resultou da colisão do rotor com o estator da máquina. Porém, muitas vezes é necessário levar em consideração a aplicação do equipamento para mensurar se um defeito é severo ou não. Por exemplo, Bonnett (2018) mostra um estudo de caso de um motor de 300 HP utilizado para bombear um fluido inflamável que apresentava problemas de atrito no rolamento. Eventualmente o defeito no rolamento gerou uma faísca que resultou na explosão e incêndio do local. O sistema ficou desativado por mais de um ano e gerou prejuízos

na ordem das centenas de milhões de dólares. A Figura 13 mostra o rotor da máquina que gerou o incêndio do estudo de caso.

Figura 13 – Rotor do motor em falha do estudo de caso.



Fonte: Bonnett (2018).

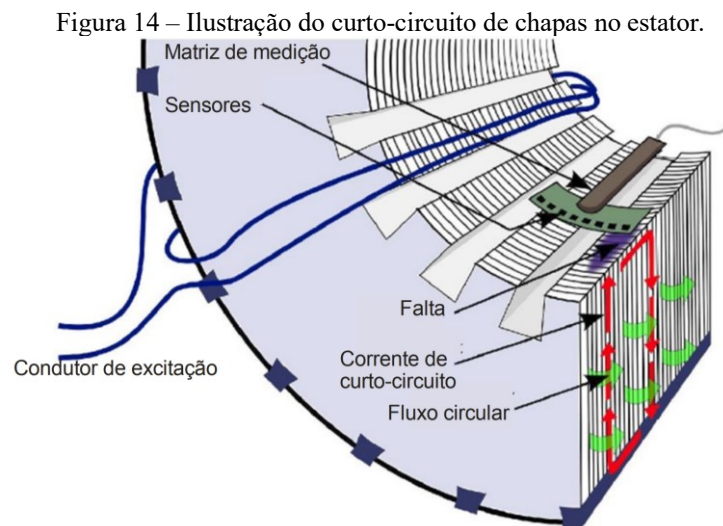
O maior problema atrelado ao descaso com o rolamento, ou a não correção do defeito em estágios iniciais, é que as faltas de natureza mecânica tendem a agravar umas às outras com mais facilidade. Por exemplo, um problema de má lubrificação do rolamento pode levar a uma vibração excessiva do rotor, que por sua vez causa raspagem do mancal, produzindo folgas. Essas folgas geram excentricidades, as quais criam desbalanceamentos magnéticos que acentuam a vibração da máquina, amplificando os defeitos.

De forma geral, defeitos no rolamento prejudicam significativamente a vida útil da máquina rotativa, principalmente por afetar componentes mecânicos do equipamento. É importante ressaltar que o agravamento de faltas de natureza mecânica é rápido e muitas vezes catastrófico (LAWRENCE, 2016).

2.2.4 Outros Defeitos Incipientes

Os defeitos descritos até então neste trabalho são os mais tradicionais e comumente discutidos na literatura sobre faltas incipientes em geradores síncronos. Entretanto, há também outros tipos de defeitos que são menos recorrentes ou que não afetam drasticamente o funcionamento da máquina elétrica. O curto-circuito de chapas do núcleo do estator é um exemplo disso. A consequência principal dessa falta é a intensificação das correntes de Foucault

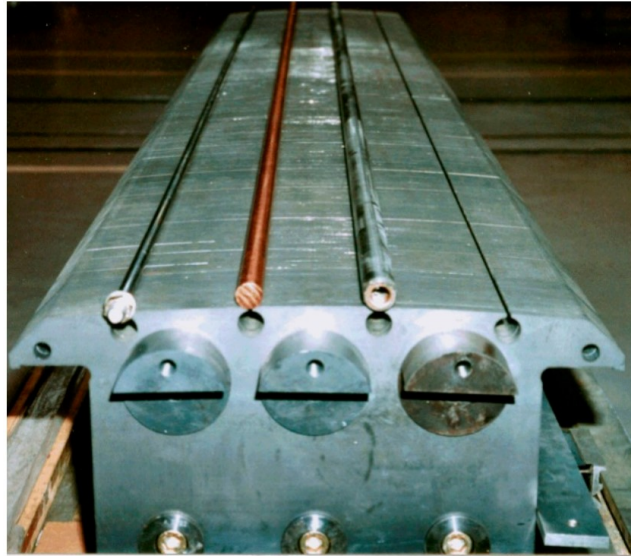
nas lâminas que estão curto-circuitadas, levando assim a uma pequena redução do rendimento da máquina e sobreaquecimento do local (RAMS, 2014). A Figura 14 ilustra esse defeito, mostrando que na região em que as lâminas estão curto-circuitadas há a circulação de uma corrente de curto circuito. Além disso, a Figura 14 apresenta também um sistema de detecção para essa falta que utiliza condutores de excitação e sensores *Hall* alocados na parte interna do estator. Resumidamente, o método consiste em aplicar uma corrente de excitação em uma bobina alojada no núcleo da máquina elétrica e monitorar a intensidade do fluxo induzido ao longo do pacote estatórico. Caso haja a existência de um defeito de curto de lâminas, o sistema de detecção identifica a região de ocorrência da falta através do valor anormal de fluxo induzido nesse local. A principal desvantagem deste método é a necessidade da parada da máquina e retirada do rotor para realização do teste de detecção da falta.



Fonte: Rams (2014).

Outra falta que pode ocorrer em um gerador síncrono é a quebra das barras da gaiola de amortecimento. Esse defeito apresenta pouco impacto no desempenho da máquina em regime permanente, pois essas barras atuam apenas na partida do gerador e em transitórios eletromecânicos que podem afetar o sincronismo do equipamento, sendo a detecção da falta realizada, geralmente, durante a partida da máquina elétrica (FROSINI, 2020). A Figura 15 mostra uma foto das barras da gaiola de amortecimento de um rotor de polos salientes em construção.

Figura 15 – Barras da gaiola de amortecimento de um polo saliente.



Fonte: Frosini (2020).

Por fim, pode-se citar a destruição de partes do núcleo do estator, como por exemplo os dentes. Esse defeito pode ocorrer após um alto estresse mecânico e/ou elétrico que danifique o pacote estatórico. Uemori (2020) mostra o estudo de caso de um gerador hidráulico que sofreu um curto-circuito monofásico que se desenvolveu rapidamente em um curto-circuito fase-fase devido à quebra do condutor neutro. A Figura 16 mostra uma parte do estator do gerador, o qual sofreu danos no núcleo e no enrolamento de armadura.

Figura 16 – Estator de um gerador síncrono hidráulico com dano no núcleo.



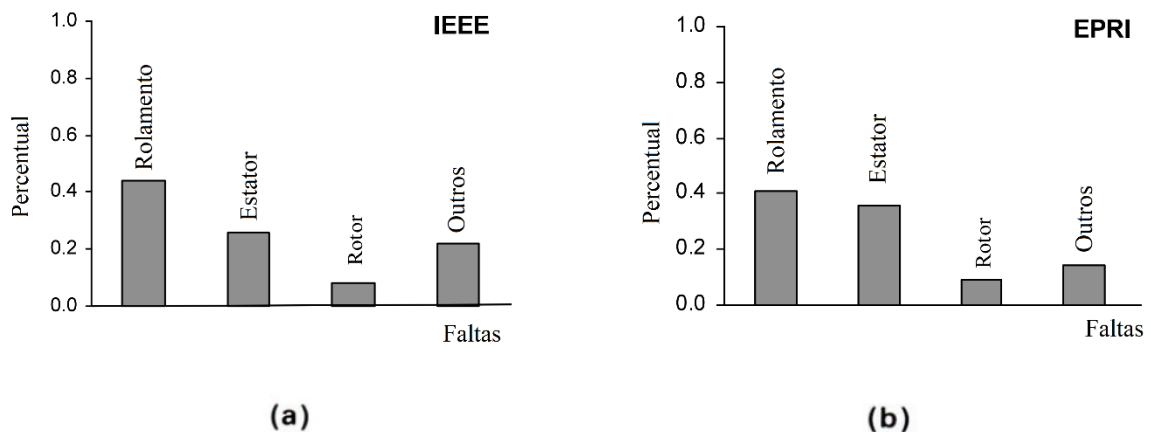
Fonte: Uemori (2020).

A destruição de uma parte do núcleo ferromagnético de uma máquina rotativa pode gerar um aumento do fluxo disperso e inserir uma maior distorção harmônica no fluxo interno (SANTOS, 2021). Por consequência disso, pode haver uma redução do rendimento e da qualidade da geração de energia elétrica do equipamento.

2.2.5 Proporção de Ocorrência dos Defeitos

Após a descrição dos diversos tipos de faltas incipientes, é necessário também conhecer quais desses defeitos provocam uma maior ocorrência de falhas nas máquinas elétricas aplicadas nas indústrias e nas usinas de geração de energia elétrica. Isso tem como objetivo apontar quais as faltas que devem ser priorizadas em sistemas ou processos de monitoramento. A Figura 17 mostra a proporção de ocorrência de falhas em motores de indução provocadas por cada tipo de defeito no estudo (a) da IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) e (b) do EPRI (Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica dos Estados Unidos da América). Não foi possível encontrar um estudo similar para geradores síncronos na literatura.

Figura 17 – Proporção de faltas em motores de indução, estudo do (a) IEEE e (b) EPRI.



Fonte: Adaptado de Singh (2003).

Nos estudos da IEEE e da EPRI, as faltas no rolamento são as que provocam um maior número de falhas em motores de indução (cerca de 40% em ambos os estudos). Em seguida, tem-se os defeitos no estator, sendo que no estudo da EPRI o percentual de ocorrências é levemente inferior ao do rolamento. No estudo da IEEE, as faltas de estator são quase metade das ocorrências nos rolamentos. Em último lugar há os defeitos no rotor, os quais para ambos os estudos apresentou um percentual de cerca de 10%.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo realizou-se uma breve revisão sobre os aspectos principais da máquina síncrona, bem como uma descrição dos diversos tipos de faltas incipientes baseada em conhecimentos difundidos na literatura. Detalhou-se as possíveis causas, consequências e proporções de ocorrência dos defeitos abordados. Observou-se que, de acordo com os estudos da IEEE e da EPRI em motores de indução, faltas no rolamento caracterizam aproximadamente 40% das ocorrências de falha, enquanto que defeitos no estator e no rotor apresentam um percentual de 40% a 50%. Estudos similares para geradores síncronos não foram encontrados.

Neste trabalho será abordado um defeito de cada tipo (rolamento, estator e rotor), os quais possam ser inseridos de forma controlada na bancada de testes disponível. Serão abordadas as faltas de excentricidade estática, perda de espiras no enrolamento de armadura e perda de espiras em um polo do rotor, que correspondem a defeitos no rolamento, no estator e no rotor, respectivamente.

O próximo capítulo descreve a operação e funcionalidade de equipamentos comerciais que realizam o monitoramento de condição de máquina através do fluxo magnético interno, da vibração mecânica e do campo magnético externo. É abordada também uma revisão das técnicas de detecção de faltas apresentadas em trabalhos acadêmicos e, por fim, as estratégias aplicadas neste trabalho para detecção, mensuração e diferenciação de defeitos através do fluxo magnético no entreferro.

3 ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES

Este capítulo aborda brevemente sistemas comerciais de monitoramento de condição de máquina, alguns trabalhos acadêmicos relevantes a respeito do tema e estratégias de detecção aplicadas no presente trabalho.

3.1 EQUIPAMENTOS COMERCIAIS DE DETECÇÃO DE FALTAS

Técnicas de detecção de faltas incipientes podem ser primeiramente divididas em *online* e *offline*. Métodos de detecção *online* correspondem a equipamentos de monitoramento de condição de máquina que realizam o acompanhamento de diferentes grandezas de operação do gerador (por exemplo: tensão, corrente, fluxo, vibração e temperatura) durante o funcionamento do equipamento, e apontam o possível desenvolvimento de um defeito incipiente ao longo do tempo. Já técnicas *offline* são métodos de detecção de faltas que são realizados durante manutenções de rotina, com a máquina parada. Dentre essas técnicas pode-se citar como exemplo inspeções visuais e testes de descargas parciais de alta tensão, os quais tem o intuito de verificar a existência de uma falta. O foco deste presente trabalho reside nos sistemas de monitoramento *online*.

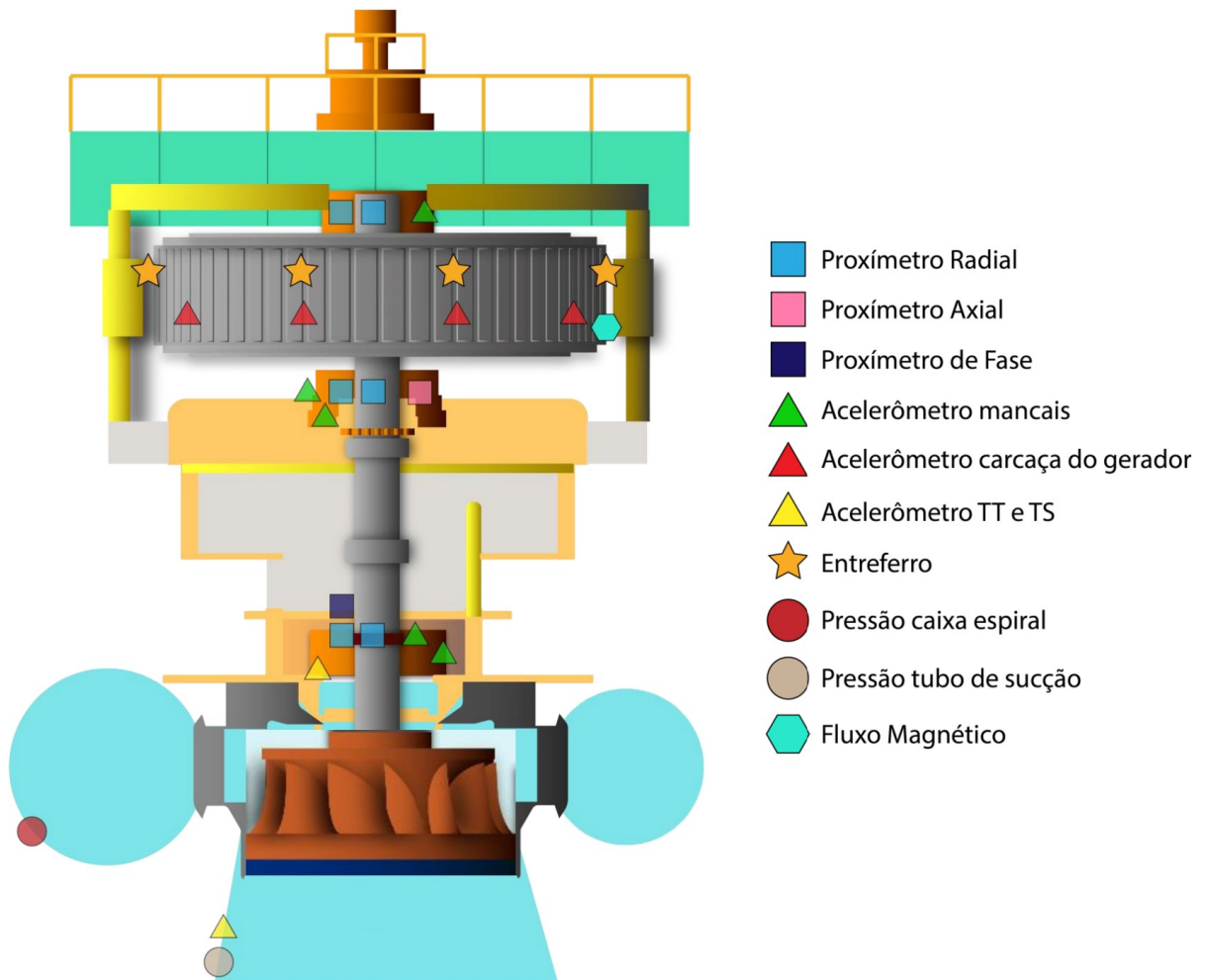
A detecção de faltas incipientes através da medição da vibração mecânica é uma metodologia consolidada no mercado atual, visto que já possui normas técnicas vigentes, como a ISO 20816-1 de 2016, a qual fornece diretrizes para equipamentos comerciais, tais como o IMx-M, o Veski CoDis e o VibraOne das empresas SKF, Iris Power e AQTech, respectivamente. A ISO 20816-1 indica os níveis de vibração máximos para partes não rotativas da máquina elétrica e quais frequências devem estar presentes nesse sinal para diferenciar o tipo de defeito mecânico. Contudo, as normas são pouco detalhadas para detecção de faltas de natureza elétrica (como defeitos nos enrolamentos de armadura e de campo). A Figura 18 mostra os sensores de vibração do IMx-M e a Figura 19 ilustra a posição de instalação dos sensores do VibraOne em um gerador hidráulico de eixo vertical.

Figura 18 – Sensores de vibração da SKF.



Fonte: SKF (2023).

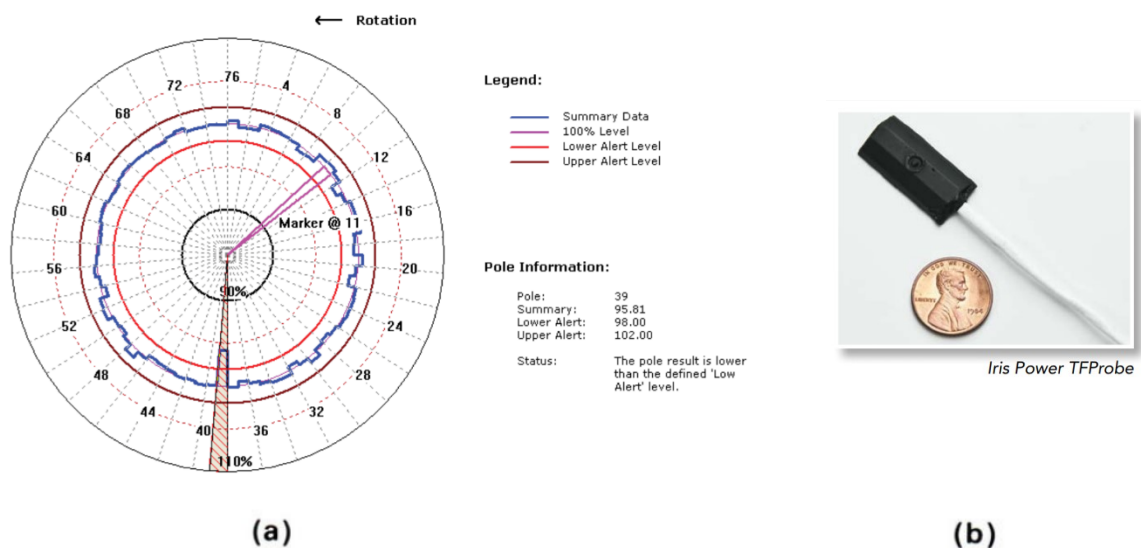
Figura 19 – Posição de instalação dos sensores do VibraOne.



Fonte: Cortesia da AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

O monitoramento do fluxo magnético interno é abordado em sua forma mais tradicional por Albright (1971) e mais modernamente por Yun (2019) considerando sensores dispostos no entreferro da máquina. Em ambas as referências, o sinal é analisado no domínio do tempo em busca de discrepâncias nos semiciclos correspondentes a cada polo da máquina, limitando a detecção às faltas de origem rotórica. Uma metodologia similar também é utilizada em equipamentos comerciais, tal como o Flux TracII-S da Iris Power. A Figura 20 (a) mostra uma carta da amplitude do fluxo magnético em um rotor de 76 polos possuindo uma anormalidade no polo de número 39, o qual se encontra com um fluxo menor e (b) uma foto do sensor de fluxo utilizado. Através do monitoramento do fluxo magnético no entreferro o equipamento é capaz de detectar a falta e o local de ocorrência. Contudo, o equipamento só é capaz de detectar defeitos nos enrolamentos do rotor.

Figura 20 – (a) Fluxo magnético no rotor medido pelo equipamento *FluxTracII-STM* e (b) sensor de fluxo.



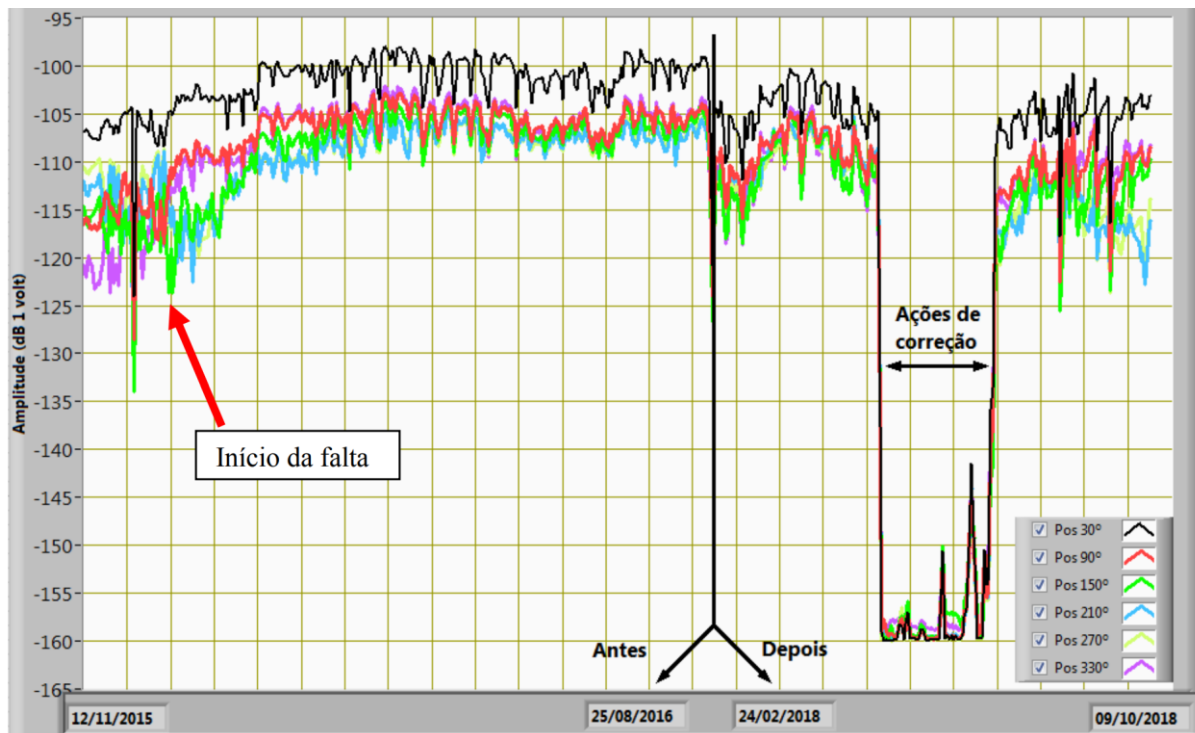
Fonte: Iris Power (2022).

As vantagens dos sistemas de monitoramento de vibração mecânica e de fluxo magnético de entreferro residem no baixo custo dos circuitos de condicionamento de sinais e pouco armazenamento de dados. Porém, esses sistemas são intrusivos ao gerador por requisitarem a parada e o desmonte de partes da máquina para instalação dos transdutores. No caso do FluxTracII-S é necessário a retirada de ao menos um polo do rotor para a instalação do sensor. Para o equipamento VibraOne, há a solicitação da colocação de transdutores na caixa espiral e no tubo de sucção.

O sistema MagAnalyzer realiza o monitoramento da condição de geradores síncronos por meio do campo magnético externo. Esse sistema foi idealizado na tese de Rigoni (2014) e

na dissertação de mestrado de Santos (2016) e foi desenvolvido em parceria com as empresas Engie Brasil Energie e Itá Energética S.A. Na sua versão mais recente, o cabeça de série foi desenvolvido com base na tese de Santos (2021), em parceria com a AQTech Engenharia e Instrumentação. O monitoramento através do campo magnético externo possui a vantagem de ser não invasivo, pois os sensores são instalados na parede interna do *housing* (para geradores de grande potência) ou na carcaça (para máquinas menores). O sistema emprega um circuito complexo de condicionamento para sinais de baixíssima amplitude e baseia-se em análises de séries temporais de históricos de amplitude de componentes harmônicas do espectro em frequência do campo magnético externo para realizar a detecção dos defeitos (SANTOS, 2021). Um protótipo do equipamento instalado na Usina Hidrelétrica de Itá foi capaz de detectar o desenvolvimento de uma falta de excentricidade no gerador, a qual foi confirmada por um equipamento comercial de monitoramento de vibração instalado na mesma unidade geradora (FREITAS, 2019). A Figura 21 mostra as séries temporais da componente de 302,14 Hz, obtidas a partir dos sinais dos seis sensores do protótipo do MagAnalyzer, utilizadas como indicativo da presença e evolução do defeito. O sistema resultou em uma patente (BR102015011438-9) intitulada “Sistema e método para identificar características de uma máquina elétrica”.

Figura 21 – Histórico da componente de 302,14 Hz do GS da UHIT de Itá.



Fonte: Santos (2021).

3.2 ESTADO DA ARTE NA ÁREA DE DETECÇÃO DE FALTAS

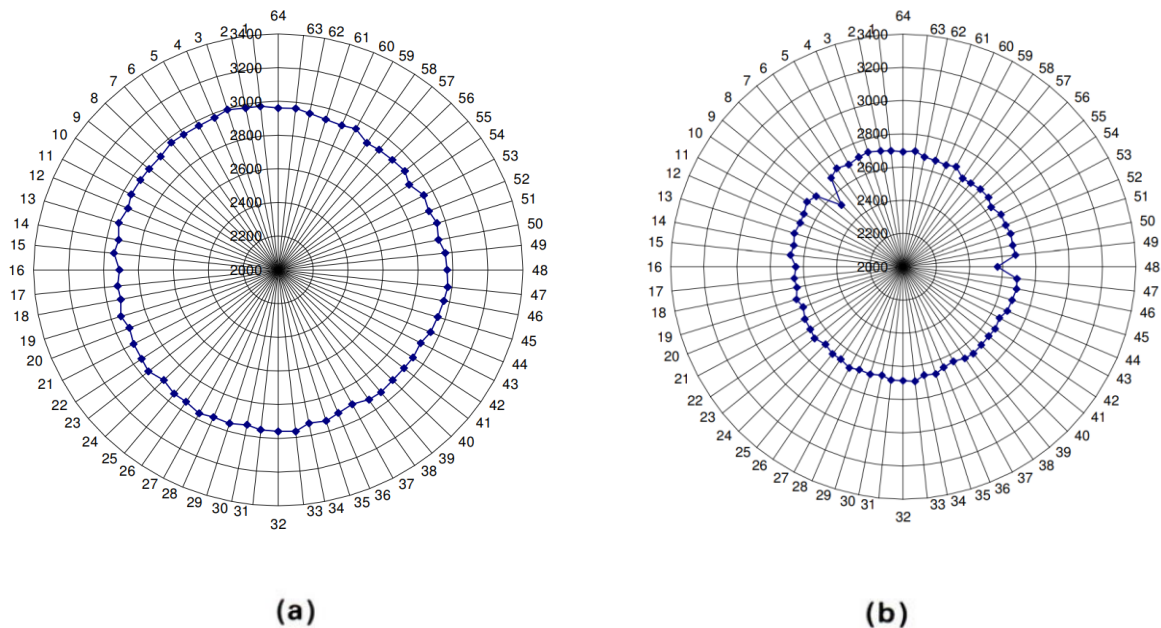
Esta seção é focada em trabalhos acadêmicos que discutem a detecção dos defeitos de perda de espiras em um polo do rotor, excentricidade estática e perda de espiras no enrolamento de armadura. Essas são as faltas que puderam ser impostas, de maneira controlada, na bancada de testes disponível para o desenvolvimento do presente trabalho, e representam, respectivamente, um defeito no rotor, no rolamento e no estator.

3.2.1 Enrolamento do Rotor

Estudos e pesquisas de detecção de faltas incipientes de natureza rotórica utilizando sensores de fluxo magnético interno (fluxo de entreferro) apontam a alta eficácia e confiabilidade desta estratégia (corroborado pelos equipamentos comerciais citados anteriormente). Além disso, sensores no interior do gerador captam fluxos de maior magnitude e são menos susceptíveis a ruídos do que sensores externos, características essas que reduzem os custos dos *hardwares* associados ao condicionamento e à filtragem dos sinais dos transdutores, apesar de terem um custo mais elevado na sua instalação.

O trabalho de Stone (2011) mostra a detecção de curto-circuito de espiras em polos do rotor, em um gerador síncrono de 64 polos salientes operando em vazio, através do monitoramento do fluxo magnético interno médio de cada polo com um sensor colado no dente do estator. O diagrama polar desse fluxo é mostrado na Figura 22 (a) para uma máquina sadia e (b) para uma máquina com curto-circuito de espiras nos polos 8 e 48, sendo a escala radial o valor do fluxo (unidade não apresentada pelos autores) e a escala na circunferência o número do polo. A detecção é realizada através da redução que o fluxo sofre nos polos defeituosos por consequência do curto-circuito de espiras. Apesar do método detectar o defeito com confiabilidade, os autores afirmam que pode haver dificuldade de mensurar o número de espiras em curto-circuito devido à variação do fluxo médio com o ponto de operação da máquina. Esse resultado é comprovado também pelos trabalhos de Shaikh (2022) e Fišer (2010) que mostram a variação do fluxo magnético médio com o carregamento da máquina e com o número de espiras em curto-circuito.

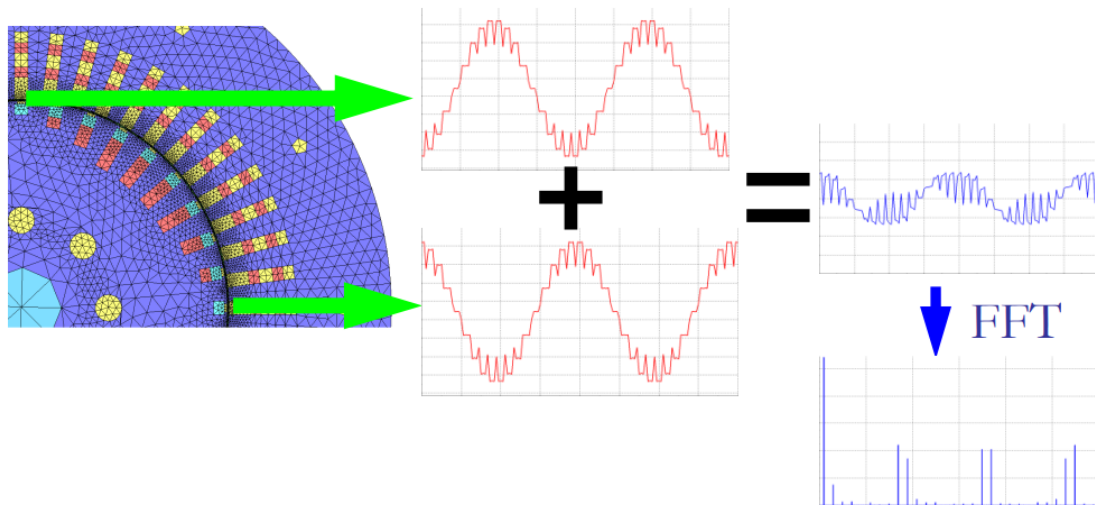
Figura 22 – Diagrama polar da (a) máquina sadia (b) com curto-circuito de espiras nos polos 8 e 48.



Fonte: Stone (2011).

Uma abordagem diferente, mas ainda utilizando o sensoriamento do fluxo magnético interno, é aplicada por Iamamura (2011). O autor sugere realizar a detecção de curto-circuito de espiras em um polo do rotor através da adição dos sinais de dois sensores que estejam defasados de 180° elétricos na circunferência interna do estator. A técnica consiste, resumidamente, que o sinal resultante será nulo quando a máquina estiver sadia e não nulo sob falta devido às assimetrias nos semiciclos. Para monitorar a condição do gerador é então realizada a FFT (Transformada Rápida de Fourier) do sinal resultante e acompanha-se os valores da componente de giro mecânico no espectro em frequência. O método é ilustrado na Figura 23. Uma desvantagem do método proposto por Iamamura (2011) é que a posição dos sensores se altera para cada máquina, conforme o número de polos do gerador. Isto é, deve-se ter o cuidado de colocar os sensores de maneira adequada, o que pode ocasionar uma maior desmontagem da máquina para realizar a fixação dos sensores no entreferro. Um leve desvio do local de instalação dos transdutores pode acarretar em dificuldades na estratégia de detecção da falta. A técnica proposta por Iamamura (2011) também não aborda uma forma de mensurar a gravidade do defeito de forma independente da variação do carregamento do gerador.

Figura 23 – Método de detecção com sensores defasados de 180° elétricos.



Fonte: Iamamura (2011).

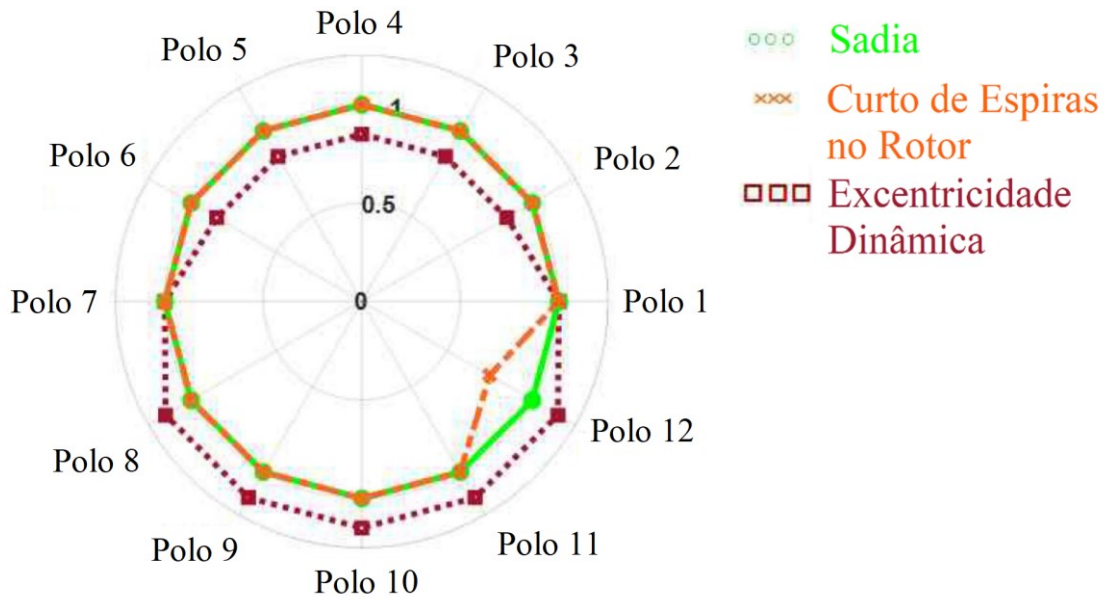
O trabalho de Rigoni (2014) realiza a detecção do defeito de curto-circuito de espiras no rotor através do histórico de amplitudes da componente de rotação no espectro em frequência do campo magnético externo. O trabalho mostra que a amplitude da frequência de giro mecânico é altamente sensibilizada pela falta. Santos (2021) mostra que a amplitude desta harmônica também é fortemente alterada com a variação do ponto de operação da máquina elétrica. Utilizando medições de vibração mecânica, Shuting (2003) mostrou que é possível realizar a detecção de defeitos no enrolamento de excitação monitorando as magnitudes de vibração na frequência de giro para o rotor e no dobro da frequência de rotação para o estator.

3.2.2 Excentricidades

A detecção de faltas de excentricidade é realizada majoritariamente de duas formas: com espectro em frequência e com gráfico polar do fluxo magnético. Em Sadeghi (2017), a detecção de excentricidade estática é feita através do monitoramento das componentes harmônicas da frequência de giro mecânico adjacentes à fundamental elétrica e das harmônicas elétricas ímpares na tensão terminal do gerador síncrono. Nas simulações realizadas com MEF (Método de Elementos Finitos) em uma máquina de quatro polos salientes e frequência das correntes de armadura de 50 Hz, os autores obtiveram variações superiores a 30 dB para as amplitudes das frequências de 25 Hz e de 75 Hz (adjacentes a fundamental elétrica) do estado sadio para excentricidade de 30% do entreferro. No estudo de Shaikh (2022) com a utilização do gráfico polar do fluxo magnético interno, o autor compara a forma de distribuição do fluxo para máquina sadia, com curto-circuito de espiras em um polo do rotor e com excentricidade

dinâmica. O gráfico polar é mostrado na Figura 24. Observa-se que a falta no rotor reduz o fluxo em um dos polos, ao passo que o defeito de excentricidade desloca o centro magnético do rotor.

Figura 24 – Gráfico polar do fluxo magnético para máquina sadia, com defeito em um polo do rotor e com excentricidade dinâmica.



Fonte: Adaptado de Shaikh (2022).

Em Mirimani (2012), a detecção de excentricidade estática é realizada através de dois sensores que são posicionados nas regiões de maior e menor entreferro em uma máquina a ímãs permanentes. Mostrou-se que a tensão induzida diminui na região com maior entreferro e o oposto ocorre no outro transdutor. Ademais, para os dois sensores, a magnitude da 3ª harmônica elétrica sofreu elevação com a inserção da falta.

3.2.3 Enrolamento do Estator

Para a detecção de perda/curto-circuito de espiras no enrolamento do estator, o método mais tradicional é o monitoramento das correntes de armadura da máquina. Em Yaghobi (2013), é mostrado que a THD (Distorção Harmônica Total) das correntes de um gerador síncrono de 50kVA/380V/50Hz do estado sadio para 10% de espiras curto-circuitadas em uma bobina de uma fase varia de 1,5% para 1,6%, ao passo que a variação do estado à vazio para carga nominal é de 1,5% para 1,58%, sendo dificultada a detecção precisa do defeito com a variação do ponto de operação. Em contrapartida, a THD do sinal de fluxo magnético externo

varia de 1,7% até 41% com a inserção do mesmo nível de defeito, e varia de 1,7% para 9,7% em vazio para carga nominal. Conforme a investigação de Yaghobi (2013), este indicador pode então detectar com maior facilidade o defeito através do fluxo magnético externo. Contudo, a detecção em estágios iniciais da falta é dificultada pela variação do carregamento do gerador.

No trabalho de Sahraoui (2006), é inserido um curto-circuito de 14 espiras no enrolamento da fase A (3% do total) em um motor de indução trifásico de 1,1kW/380V/50Hz operando com escorregamento de 5%. Observou-se que houve variações superiores a 10 dB nas componentes de frequência 115 Hz e 415 Hz no espectro em frequência da corrente da fase A, medido por um sensor de corrente alocado no condutor de alimentação da fase A do motor.

Em relação às grandezas de fluxo magnético de entreferro e de vibração mecânica na detecção do defeito no enrolamento de armadura, tem-se como exemplo o trabalho de Lamim Filho (2013). Nele é mostrado que houve alterações das amplitudes da 6ª e 8ª harmônica do fluxo magnético (360 Hz e 480 Hz) e da 21ª harmônica na vibração mecânica (1260 Hz) com a inserção de uma falta no enrolamento de armadura para um motor de indução trifásico de 5CV/220V/60Hz. Os testes foram conduzidos apenas para a máquina operando a plena carga.

3.3 ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO APLICADAS

Nesta seção são abordadas as estratégias aplicadas neste trabalho para realizar a detecção das faltas de perda de espiras no enrolamento de excitação, excentricidade estática e perda de espiras no enrolamento de armadura.

3.3.1 Perda de Espiras no Enrolamento de Excitação

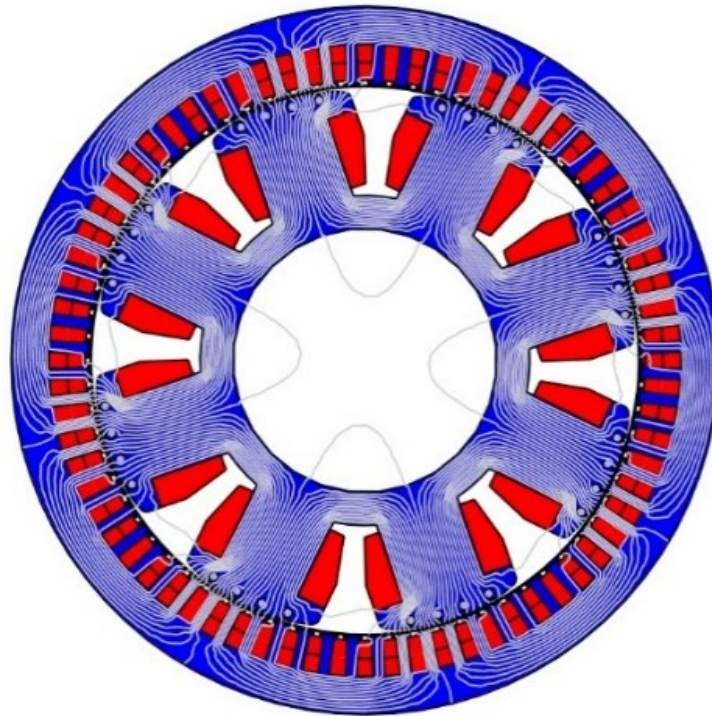
Descreveu-se, nas duas seções anteriores, que a perda de espiras no enrolamento de excitação pode ser detectada através de assimetrias nos semiciclos do fluxo magnético de entreferro ou através do monitoramento de componentes harmônicas inferiores à frequência fundamental elétrica, para máquinas com número de polos superior a dois. Será visto que ambas as técnicas se sustentam no mesmo princípio.

Sob aspectos de análise, simplificação e exemplificação, considera-se um gerador síncrono de oito polos conectado a uma barra infinita de frequência fundamental 60 Hz e que possui uma bobina sonda instalada em um dente do estator operando em tensão, potência e fator de potência nominais. Conforme mostrado em (2.1), a máquina terá uma frequência de rotação de 15 Hz (900 rpm). A Figura 25 apresenta uma carta de distribuição de fluxo, proveniente da

simulação com cálculo de campos pelo método de elementos finitos (MEF), de um GS utilizado nos experimentos deste trabalho e instalado no Laboratório de Máquinas Elétricas (LABMAQ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) operando em vazio. Visualmente, pode-se notar que as quantidades das linhas de fluxo em cada polo do rotor são as mesmas.

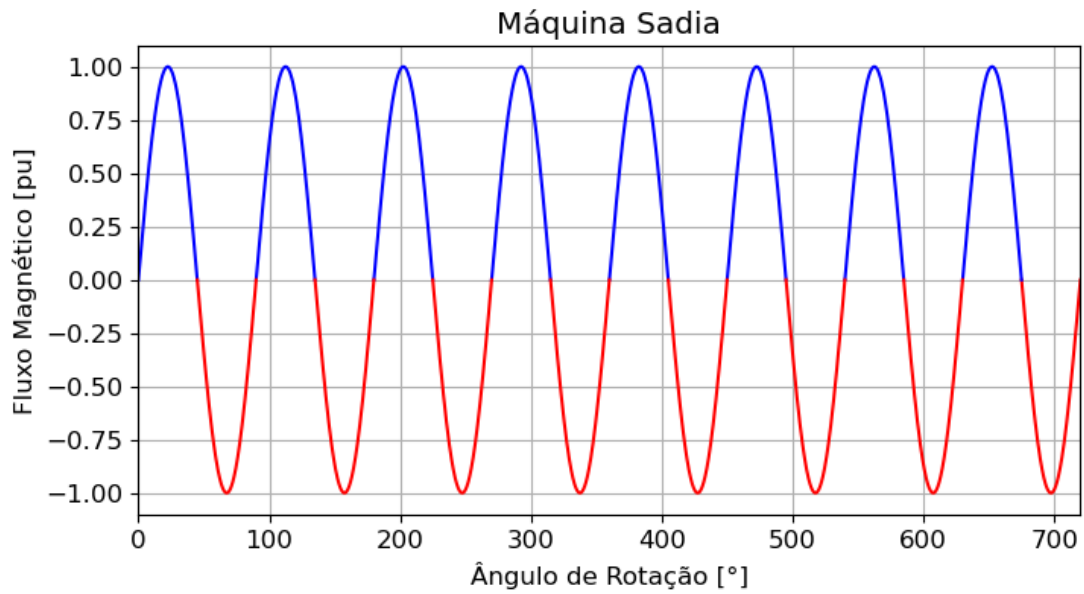
Se todos os polos do rotor desse gerador forem construtivamente idênticos e igualmente excitados, o fluxo magnético medido pela bobina sonda em dois giros da máquina elétrica seria idealmente sinusoidal com frequência de 60 Hz, como mostrado na forma de onda obtida analiticamente da Figura 26, sendo que cada semiciclo é produzido pelo fluxo de um polo (cada polo norte produz um semiciclo positivo e cada polo sul um semiciclo negativo, ou vice-versa).

Figura 25 – Simulação através do MEF para um gerador síncrono de 8 polos.



Fonte: Rigoni (2014).

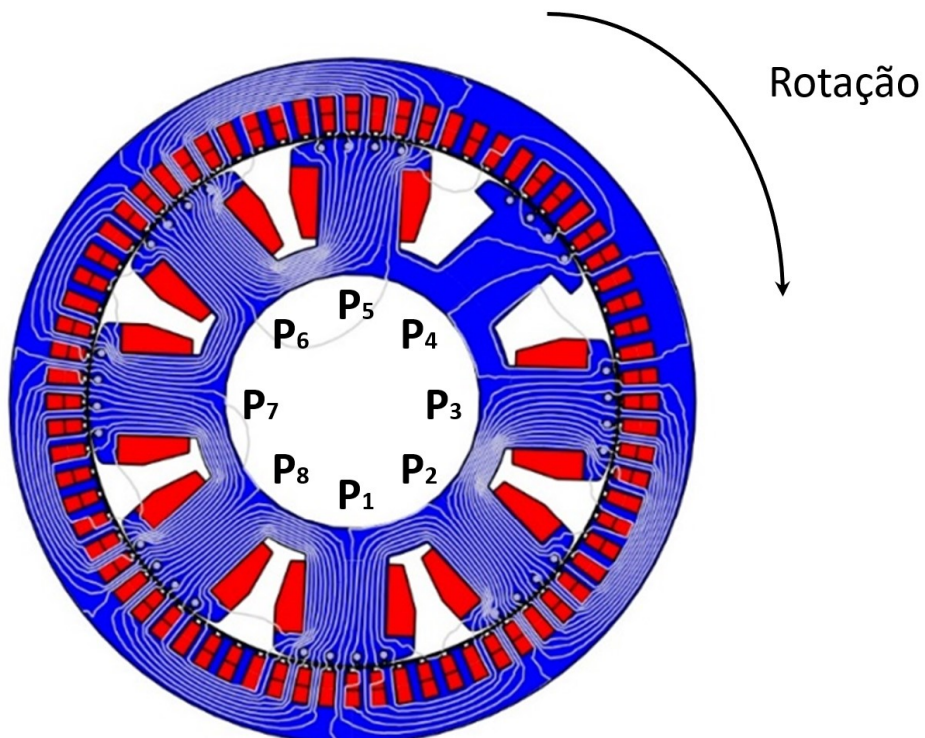
Figura 26 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada em uma bobina sonda no entreferro, máquina sadia.



Fonte: Autor.

Agora, em um segundo caso, considera-se que todas as espiras de um dos polos do rotor foram perdidas. A carta de distribuição de fluxo obtida por MEF deste novo caso é mostrada na Figura 27. Nota-se que a quantidade de linhas de fluxo no polo com defeito (P_4) diminui drasticamente.

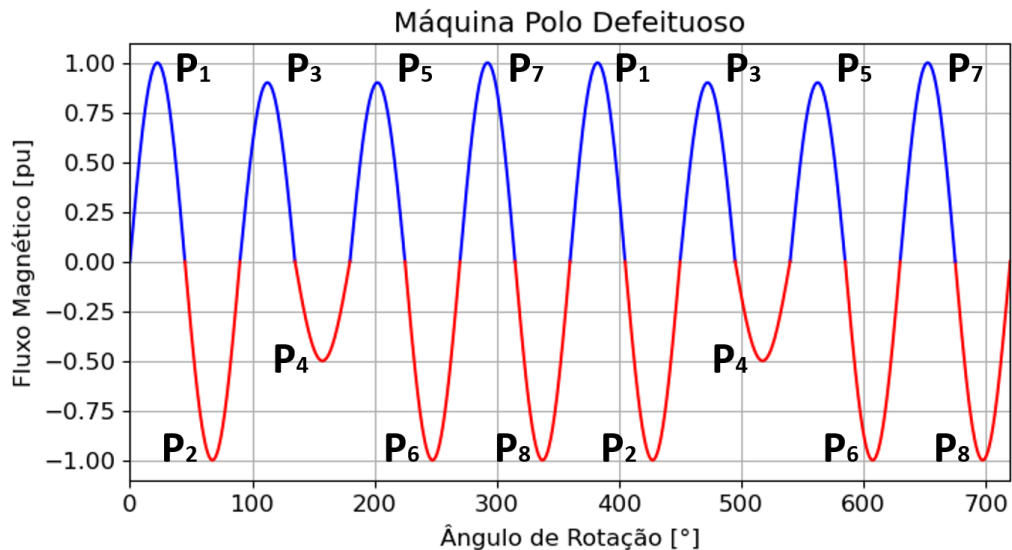
Figura 27 – Simulação com perda de espiras em um polo do rotor.



Fonte: Adaptado de Rigoni (2014).

Para este segundo caso, o fluxo magnético medido pela bobina sonda deixará de ser homogêneo em um período de giro mecânico, pois nos instantes de tempo que o polo defeituoso “passa” pela bobina sonda, a quantidade de linhas de fluxo que atravessa a seção transversal do sensor será menor. A Figura 28 ilustra de maneira simples e analiticamente este fato.

Figura 28 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada em uma bobina sonda no entreferro, máquina com polo defeituoso.



Fonte: Autor.

Com a inserção do defeito, a forma de onda do fluxo magnético apresenta uma frequência fundamental de 15 Hz, a qual se trata da frequência de giro mecânico (de rotação). Assim, do caso sadio ao caso com defeito, a amplitude da frequência de rotação no espectro em frequência do fluxo magnético sofrerá aumento. Deste modo, é possível detectar a falta através das assimetrias entre os semiciclos e/ou através da variação da amplitude da frequência de rotação, que em si são ocasionadas pelo mesmo fato, apenas analisado de maneira diferente. Os trabalhos acadêmicos citados anteriormente não apresentam uma forma de mensurar o nível de gravidade do defeito, e alguns dos métodos só são aplicáveis a um ponto de operação fixo. Este trabalho se propõe a resolver ambos os problemas para este tipo de falta.

Pelo que foi exposto, este defeito possui duas características principais: o aumento da amplitude da frequência de giro e a independência da posição da bobina sonda nos dentes do estator. A segunda característica é justificada pelo fato de que o defeito gira com o rotor, ou seja, independentemente da localização do sensor, o polo defeituoso em algum momento “passa” pela sua frente. Portanto, se múltiplos sensores forem colocados ao redor do gerador, o defeito sensibilizará a amplitude em todos de maneira semelhante, apenas haverá defasagens

das formas de onda obtidas pelos sensores dependendo do posicionamento. Assim, a utilização de um único sensor é suficiente para realizar a detecção da falta. A mensuração da severidade do defeito pode ser feita através da amplitude da frequência de rotação no espectro do fluxo magnético. Porém, como apresenta o trabalho de Santos (2021), o valor da amplitude dessa componente é dependente do ponto de operação, o que gera dificuldades no emprego da metodologia.

Dado o que foi discutido anteriormente e recapitulando que a operação de um gerador síncrono é caracterizada pelo carregamento de seus dois enrolamentos (de excitação e de armadura), propõe-se que uma condição necessária para dissociar uma alteração causada por uma falta de outra causada por uma mudança do ponto de operação é monitorar, pelo menos, uma grandeza de cada enrolamento e outra que caracterize o defeito. Neste trabalho será monitorada a Distorção Harmônica Individual (DHI_1), definida pela razão entre a amplitude da componente de rotação (A_{mec}) e a amplitude da frequência fundamental elétrica (A_{el}), dada pela equação (3.1), em função da amplitude da corrente de excitação da máquina. Rigoni (2014) empregou este conceito, com a mesma intenção deste presente trabalho, porém sem a máquina estar sincronizada e para a estratégia utilizando sensores externos.

$$DHI_1 = \frac{A_{mec}}{A_{el}} \quad (3.1)$$

Assim, são acompanhadas: a amplitude da frequência de giro mecânico (caracteriza o defeito) e a amplitude da frequência fundamental elétrica (caracteriza o enrolamento de armadura), ambas no espectro do fluxo magnético e a magnitude da corrente de excitação (caracteriza o enrolamento de excitação).

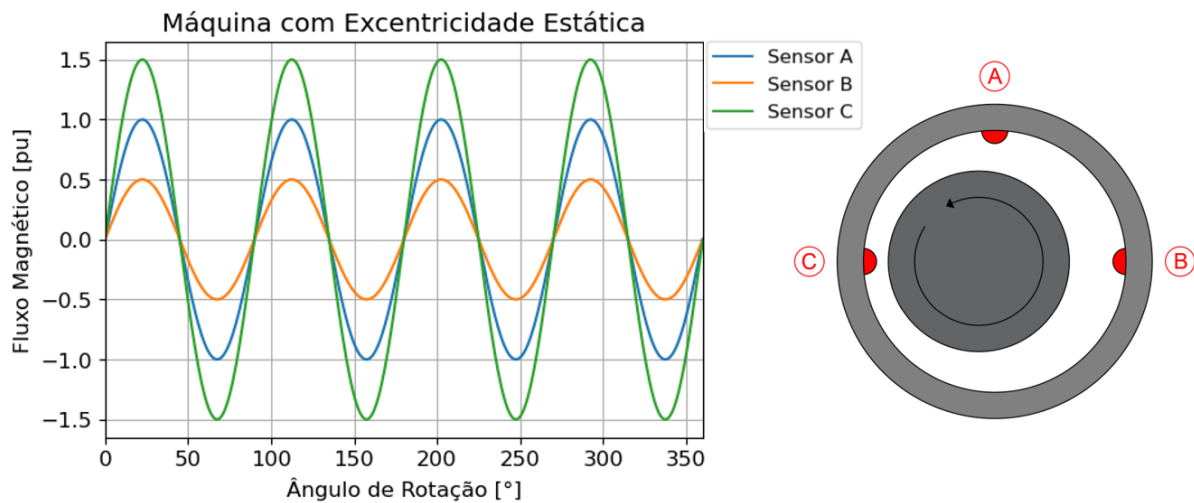
A DHI é um indicador muito utilizado para mensurar a qualidade de energia em sistema de energia elétrica e é apresentado no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este indicador provavelmente apresenta resultados melhores do que apenas o monitoramento da amplitude da frequência de rotação, pois é menos suscetível a transitórios eletromagnéticos e menos dependente do ponto de operação.

3.3.2 Excentricidade Estática

Como mencionado anteriormente, neste trabalho será abordada apenas a excentricidade estática, pois a bancada de ensaios disponível não permite impor, de maneira controlada, excentricidades dinâmicas.

Pelo que foi exposto nas seções 2.2.3 e 3.2.2, pode-se afirmar que a principal característica dessa falta é a localidade. Pela Figura 11 (b), fica claro que um sensor posicionado no lado esquerdo do gerador “enxergará” uma amplitude de fluxo maior do que o do lado direito, visto que o entreferro é menor. Além disso, se a máquina da Figura 11 (b) possuísse sensores instalados apenas na parte superior e inferior, esses seriam muito pouco sensibilizados, pois o tamanho do entreferro seria relativamente pouco alterado. A Figura 29 apresenta, analiticamente e de maneira qualitativa, a forma de onda do fluxo magnético idealizada nos sensores de fluxo posicionados no interior da máquina na condição de excentricidade estática descrita anteriormente (rotor deslocado para a esquerda).

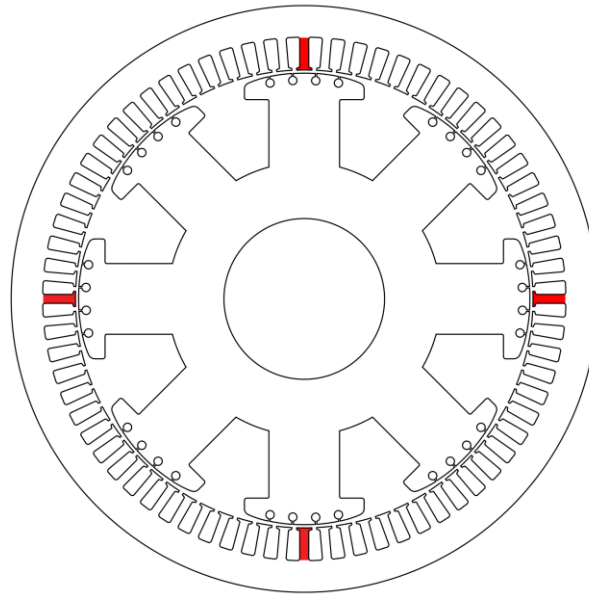
Figura 29 – Forma de onda do fluxo magnético idealizada nas bobinas sondas no entreferro, máquina com excentricidade estática.



Fonte: Autor.

Assim, propõe-se que sejam instalados 4 sensores defasados de 90° no espaço nos dentes do estator, como por exemplo mostra a Figura 30 em um gerador de 8 polos salientes. Dessa maneira, é possível não só detectar a falta, mas também indicar a direção da excentricidade.

Figura 30 – Distribuição de sensores para detecção de excentricidade.



Fonte: Autor.

Uma vez definido o número de sensores, é necessário escolher uma grandeza para mensurar o nível do defeito. Além disso, é necessário que tal variável seja imune (ou pouco sensibilizada) pelo ponto de operação do gerador.

Tomando como exemplo a distribuição dos sensores da Figura 30, aqueles posicionados no eixo vertical devem mensurar o grau de excentricidade “para cima e para baixo”. Os sensores posicionados no eixo horizontal determinam o nível “para direita e para esquerda”. No caso hipotético do deslocamento para a direita do rotor, o sensor posicionado a direita verá um aumento do fluxo magnético, o da esquerda uma redução e os sensores verticais pouca (ou até nenhuma) variação. Assim, o que caracteriza a presença do defeito é a diferença entre os fluxos eficazes dos sensores que estão em um mesmo eixo. Para resolver o problema da alteração do ponto de operação, propõe-se normalizar essa diferença dos fluxos pelo valor médio dos fluxos em valor eficaz naquele eixo. Utiliza-se a normalização pela média dos fluxos com a expectativa que essa grandeza seja pouco influenciada pela presença da excentricidade estática, pois à medida que o rotor se desloca, o fluxo medido por um sensor aumentará e o do outro reduzirá, de modo que um lado “compensa” o outro. Desta maneira, define-se pela equação (3.2) a diferença dos fluxos de um eixo ($\Delta\Phi_E$), onde Φ_{0° é o fluxo eficaz medido pelo sensor de referência e Φ_{180° o fluxo eficaz medido pelo sensor defasado de 180° na circunferência interna do estator em relação ao sensor de referência.

$$\Delta\Phi_E = 2 \cdot \frac{\Phi_{0^\circ} - \Phi_{180^\circ}}{\Phi_{0^\circ} + \Phi_{180^\circ}} \quad (3.2)$$

Aplicando o indicador apresentado em (3.2) para os dois eixos (horizontal e vertical) em função da corrente de excitação, propõe-se a estratégia para detectar o defeito e determinar a direção da excentricidade de maneira independente do ponto de operação.

3.3.3 Perda de Espiras no Enrolamento de Armadura

Como visto na seção 2.2.1, para um gerador trifásico operando conectado a uma barra infinita, a perda de espiras no enrolamento de uma das fases do estator não provoca desbalanceamento significativo das tensões terminais, pois essas são impostas pelo sistema. Portanto, o problema se reflete diretamente em um desbalanceamento das correntes das três fases. Apesar disso, utilizar essa informação para realizar a detecção em estágios iniciais desse tipo de falta não é interessante, como foi mostrado por Yaghobi (2013). Os trabalhos de Lamim Filho (2013), Rigoni (2014) e Santos (2021) procuram realizar a detecção deste tipo de defeito monitorando componentes harmônicas de alta ordem (15ª em diante) através de grandezas como vibração mecânica, fluxo interno e campo magnético externo do gerador. Além do processo de detecção ser complexo, os métodos estudados são dependentes do ponto de operação, do posicionamento dos sensores e não são capazes de mensurar o grau de severidade do defeito. Isso reafirma que, apesar de ser uma das faltas mais comuns, é também a mais difícil de ser detectada em seus estágios iniciais.

O número mínimo de sensores necessários para detectar este tipo de falta não é uma questão trivial de ser resolvida. A perda de espiras ocorre em uma parte específica do estator, de modo que o problema é estático para um sensor que se encontra também localizado no estator da máquina. Em contrapartida, a alteração dos níveis de corrente e do fluxo no interior da máquina produzem modificações ao longo de todo o entreferro do gerador. Com essas informações, conclusões e hipóteses, o presente trabalho propõe utilizar a mesma metodologia proposta para detecção de perda de espiras no enrolamento de excitação, porém monitorando não apenas a DHI da frequência de rotação do fluxo no entreferro, mas também a DHI de outras componentes harmônicas da frequência de rotação, dadas pela equação (3.3), sendo DHI_n a distorção harmônica individual da componente de ordem n da frequência de giro mecânico, $A_{n,mec}$ a amplitude da n -ésima harmônica da frequência de rotação e A_{el} a amplitude da

componente da frequência fundamental elétrica. Isso tem o objetivo de encontrar quais harmônicas são mais sensibilizadas por esse defeito.

$$DHI_n = \frac{A_{n,mec}}{A_{el}} \quad (3.3)$$

Considera-se então que a frequência fundamental da máquina é a frequência de giro mecânico e que as distorções harmônicas individuais são todas em relação a frequência fundamental elétrica. Dessa maneira, a DHI_1 é a distorção harmônica individual da componente fundamental de rotação, a DHI_2 é a distorção harmônica individual da componente de 2ª ordem da frequência de giro mecânico, a DHI_3 é a distorção harmônica individual da componente de 3ª ordem da frequência de giro mecânico e assim por diante. Cada um desses indicadores DHIs são acompanhados/monitorados em função da corrente de excitação para múltiplos sensores posicionados ao redor do entreferro.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo abordou equipamentos comerciais de monitoramento de condição de máquina que utilizam diversas grandezas para detecção de faltas (fluxo, vibração, campo externo e temperatura). Foram descritas também as metodologias empregadas por outros trabalhos acadêmicos, abordando algumas de suas principais limitações. A partir dessas técnicas e das características de cada defeito, levantou-se estratégias e melhorias para detectar e mensurar a gravidade das faltas de perda de espiras no enrolamento de excitação, excentricidade estática e perda de espiras no enrolamento de armadura. Tem-se também como objetivo mostrar que as técnicas propostas podem distinguir um defeito de uma alteração do ponto de operação do gerador.

O capítulo seguinte descreverá a operação dos sensores de fluxo magnético interno, o *hardware* eletrônico utilizado para aquisição de sinais, as técnicas computacionais para melhoramento dos dados obtidos, a bancada de ensaios que permite impor, de maneira controlada, faltas em um gerador de polos salientes de 8 polos e os experimentos realizados.

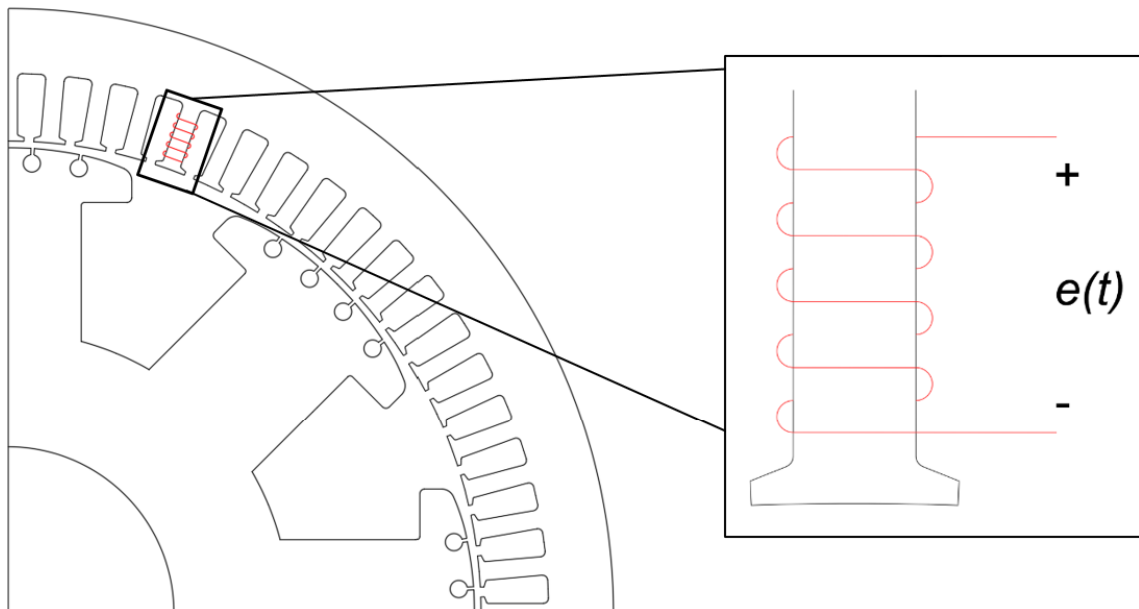
4 APARATO EXPERIMENTAL E ENSAIOS REALIZADOS

Neste capítulo será apresentado o aparato experimental utilizado para realizar as medições de fluxo no interior da máquina e a descrição de como os ensaios foram realizados.

4.1 OS SENSORES DE FLUXO MAGNÉTICO DE ENTREFERRO

Os sensores utilizados neste trabalho para medição do fluxo magnético são bobinas exploratórias, ou bobinas sondas. Este tipo de sensor consiste do enrolamento de algumas espiras em um dente do estator ao longo de todo o pacote estatórico do núcleo. A Figura 31 mostra um transdutor desse tipo posicionado no quinto dente de um gerador síncrono de 8 polos.

Figura 31 – Bobina exploratório ou bobina sonda.



Fonte: Autor.

Pela Lei de Faraday-Lenz, a tensão induzida nos terminais do sensor $e(t)$ é dada pela equação (4.1), onde N é o número de espiras e $\varphi(t)$ é o fluxo magnético que atravessa as espiras do sensor (BASTOS, 2004).

$$e(t) = -N \frac{d\varphi}{dt}(t) \quad (4.1)$$

A partir da medição da tensão induzida na bobina exploratória e o conhecimento do número de espiras do transdutor, calcula-se o fluxo magnético através da equação (4.2).

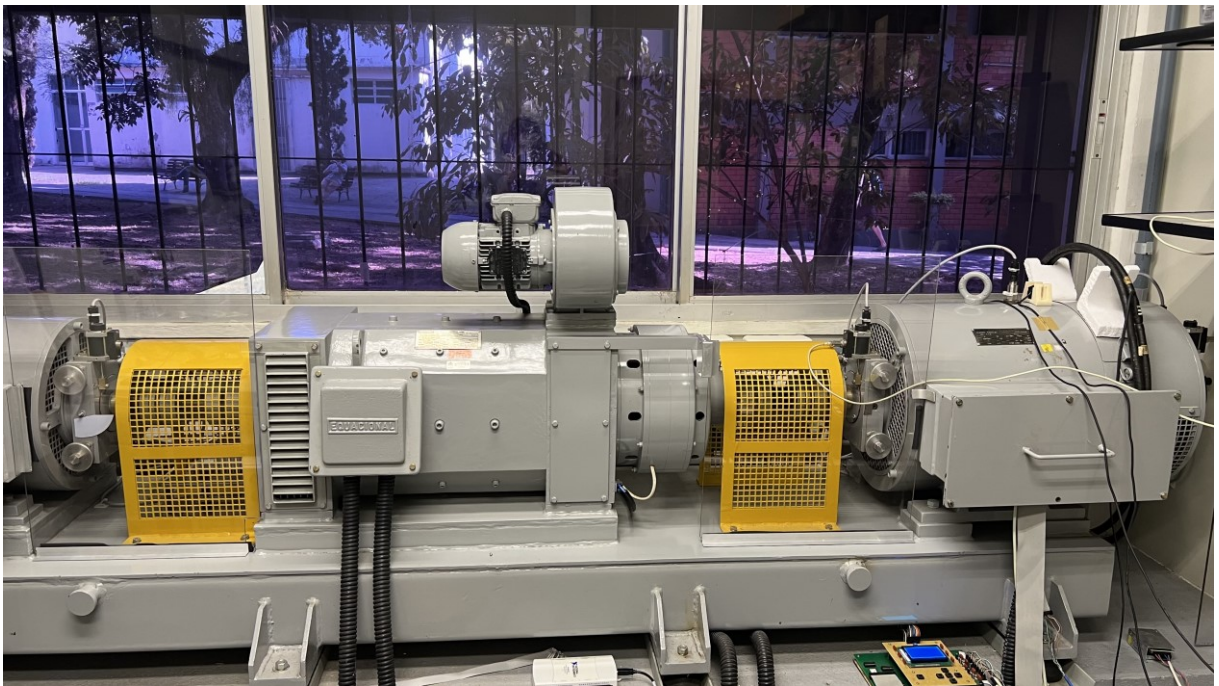
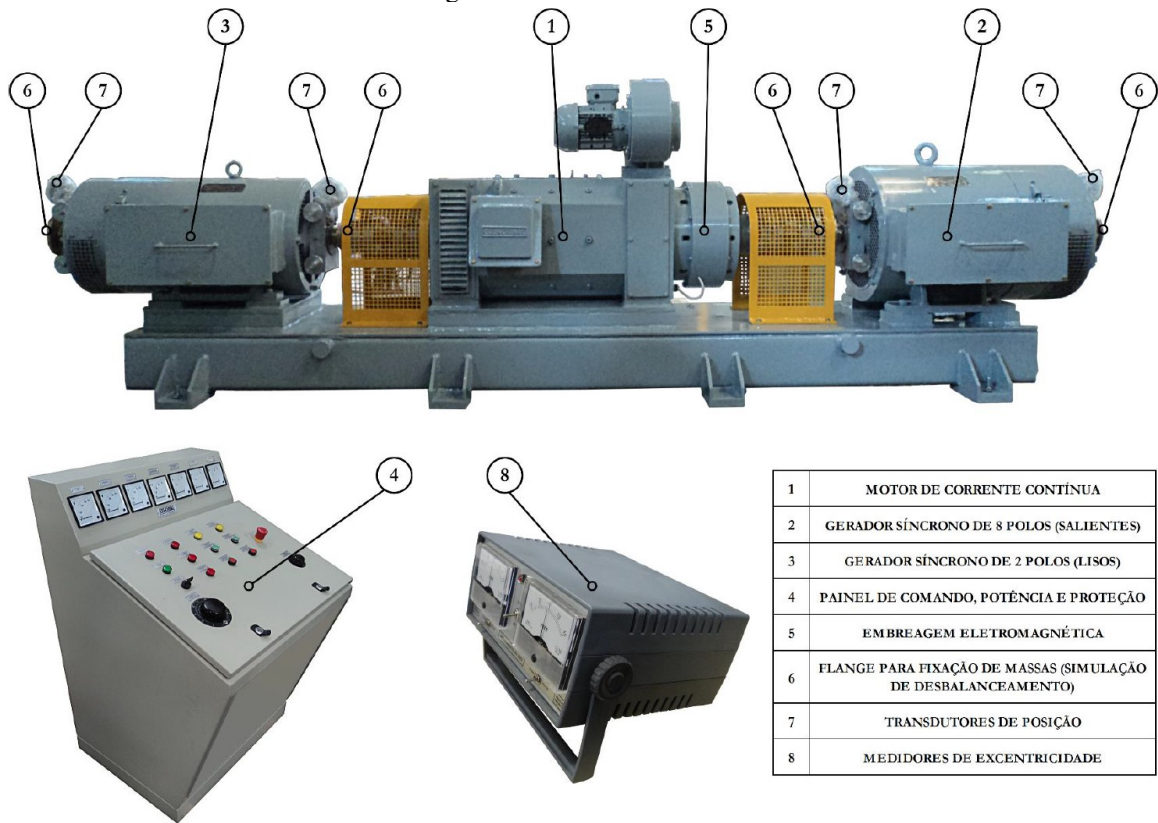
$$\varphi(t) = -\frac{1}{N} \int e(t) dt \quad (4.2)$$

A principal vantagem desse sensor, e seu posicionamento no interior da máquina, é a alta magnitude da tensão induzida nos seus terminais, pois as linhas de fluxo magnético provindas do rotor são concentradas justamente nos dentes do estator (Figura 24 e Figura 26), visto que são feitos de material ferromagnético, o que elimina a necessidade de um circuito eletrônico complexo de condicionamento de sinais. Outra característica benéfica é que devido ao posicionamento do sensor no interior do gerador, a carcaça do próprio equipamento funciona como blindagem para ruídos eletromagnéticos. A desvantagem desta estratégia de sensoriamento é sua instalação, pois caso os transdutores não sejam inseridos ao longo da construção da máquina, é necessário desmontar parte do gerador para fixar os sensores na superfície do dente (isto é, colar o sensor em uma parte do dente).

4.2 BANCADA DE TESTES

Fabricada pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, a bancada utilizada para realização dos ensaios experimentais desse trabalho encontra-se instalada no LABMAQ da UFSC e está ilustrada na Figura 32. A bancada consiste de três máquinas de eixo horizontal acopladas entre si em uma mesma base. À esquerda, tem-se um gerador síncrono trifásico de 2 polos lisos, ao centro um motor de corrente contínua com excitação independente, que opera como máquina motriz para o sistema, e à direita, um gerador síncrono trifásico de 8 polos salientes. Os parâmetros nominais destas máquinas podem ser vistos na Tabela I.

Figura 32 – Bancada de testes.



Fonte: Equacional (2014).

Tabela I – Parâmetros das máquinas elétricas da bancada de testes.

Descrição	Motor de Corrente Contínua Aberto com Ventilação Forçada	Gerador Síncrono de Polos Lisos Aberto Autoventilado	Gerador Síncrono de Polos Salientes Aberto Autoventilado
Modelo	EMC1 – 180 LQ	EGT1 – 180 M	EGT1 – 225 M ESP
Fabricante	EQUACIONAL	EQUACIONAL	EQUACIONAL
Potência	10 kW (5 + 5)	10 kVA	10 kVA
Rotação	700 (SER) / 4000 (PAR) RPM	3000 / 3600 RPM	750 / 900 RPM
Tensão de Armadura (Ligação)	220 V (SÉRIE/PARALELO)	380 V (Y + N)	380 V (Y + N)
Corrente de Armadura	56 A	15,2 A	15,2 A
Frequência	CC	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Tensão de Campo	220 V	220 V	220 V
Corrente de Campo	5,5 / 1,6 A	2,1 A	3,5 A
Fator de Potência	-	0,8 indutivo	0,8 indutivo
Classe de Isolamento	155°C (F)	155°C (F)	155°C (F)
Tipo de Resfriamento	Ventilação Forçada	Autoventilado	Autoventilado

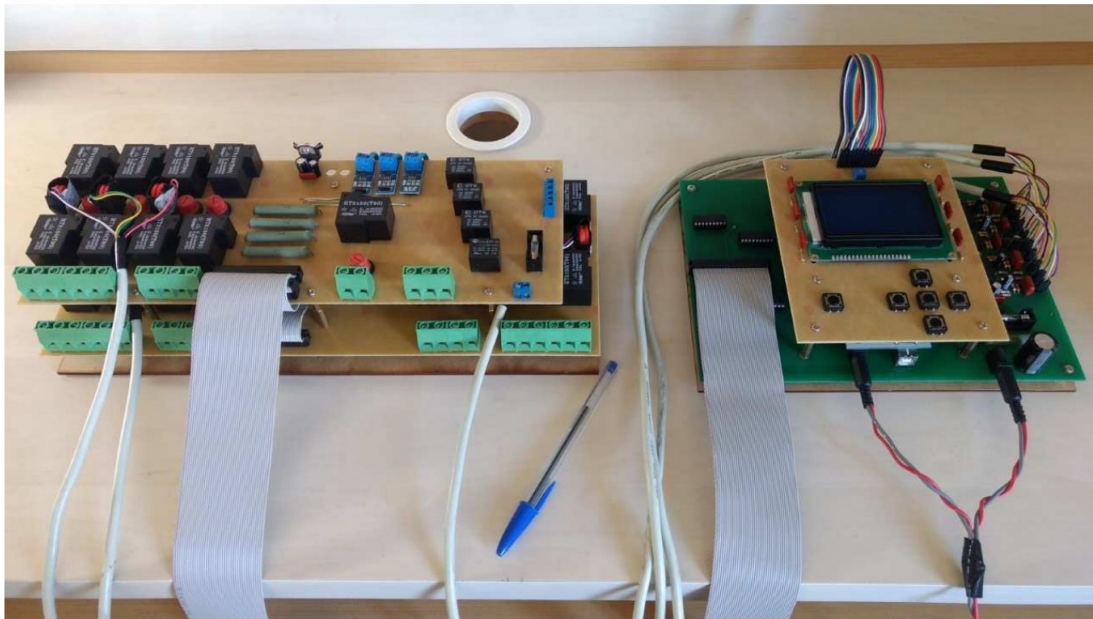
Fonte: Equacional (2014).

Essa bancada de testes permite a imposição, de forma controlada, de diferentes tipos de defeitos, sejam de natureza elétrica ou mecânica, no rotor, estator e núcleo de ambos os geradores síncronos. As faltas possíveis de serem simuladas atualmente são:

- Retirada de espiras de um polo do rotor;
- Retirada de espiras de um polo do estator (qualquer fase);
- Curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator;
- Deslocamento de eixo (excentricidade estática);
- Perda de barras da gaiola de amortecimento;
- Desbalanceamento do rotor (vibração).

Hessmann (2018) desenvolveu, para o GS de polos salientes, um equipamento capaz de inserir faltas de natureza elétrica, mostrado na Figura 33, sem realizar o desligamento da máquina, ou seja, de maneira *online*. Por essa razão, os ensaios experimentais realizados ao longo do presente trabalho foram conduzidos no GS de polos salientes da bancada.

Figura 33 – Equipamento para inserção *online* de faltas.

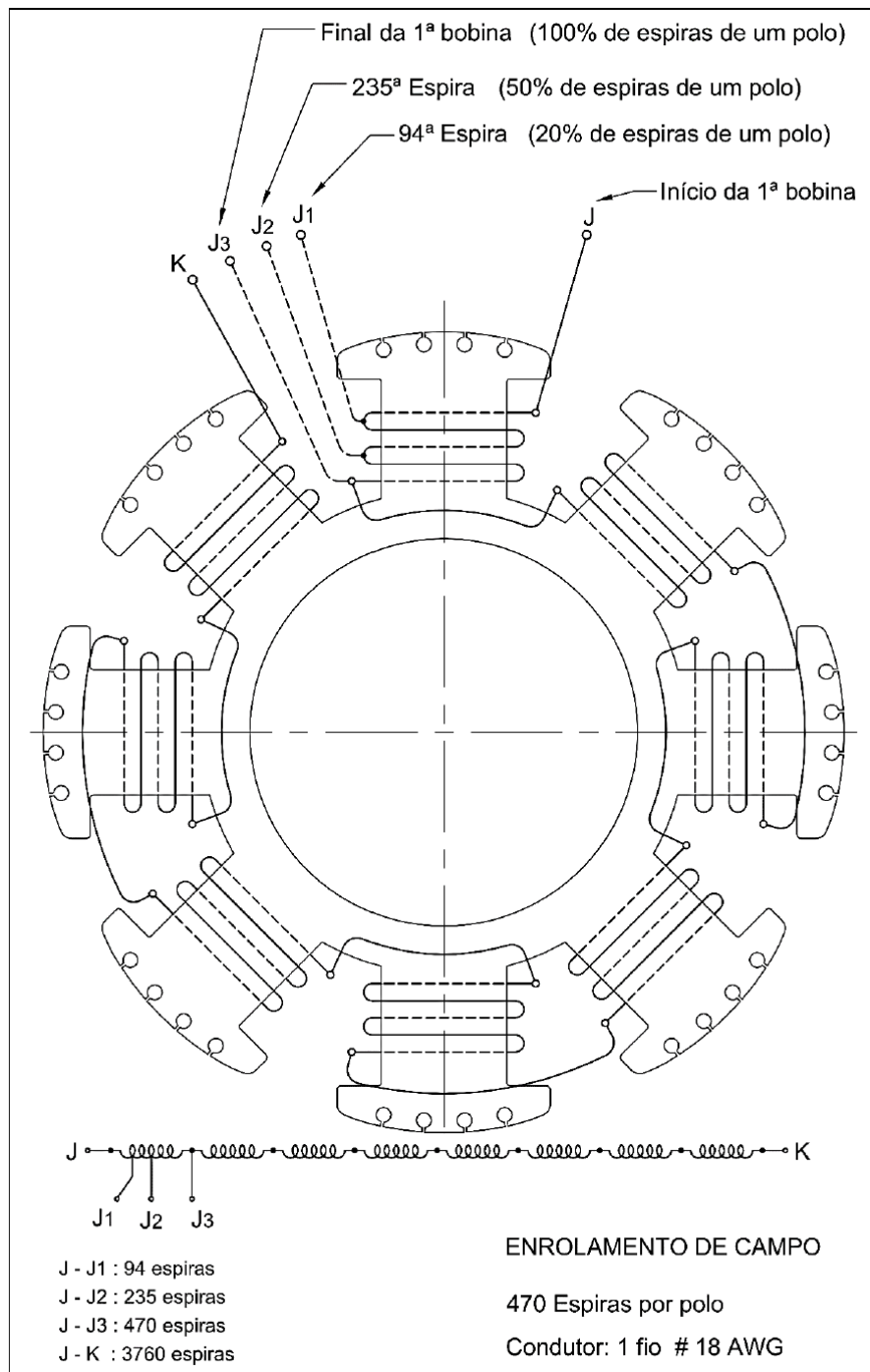


Fonte: Hessmann (2018).

A imposição de defeitos de modo *online* permite diferenciar alterações causadas pela inserção de faltas de alterações causadas por uma leve mudança do ponto de operação durante o religamento da máquina. Para os defeitos de natureza mecânica (desalinhamento, desbalanceamento e perda de barras de amortecimento) se faz obrigatória a parada do gerador para a imposição da falta, por motivos de proteção do equipamento e segurança do operador.

O esquema para retirada de espiras de um polo do rotor (perda de espiras no enrolamento de excitação) é mostrado na Figura 34. Em condição normal de operação o enrolamento de campo é alimentado através dos terminais J e K. A inserção do defeito é realizada através do chaveamento do terminal de alimentação do enrolamento de campo J para J1, ou J2, ou J3, correspondendo J1 ao nível mais brando deste tipo de falta (retirada de 20% das espiras de um polo) e J3 o mais severo, onde há a retirada de todas as espiras do polo.

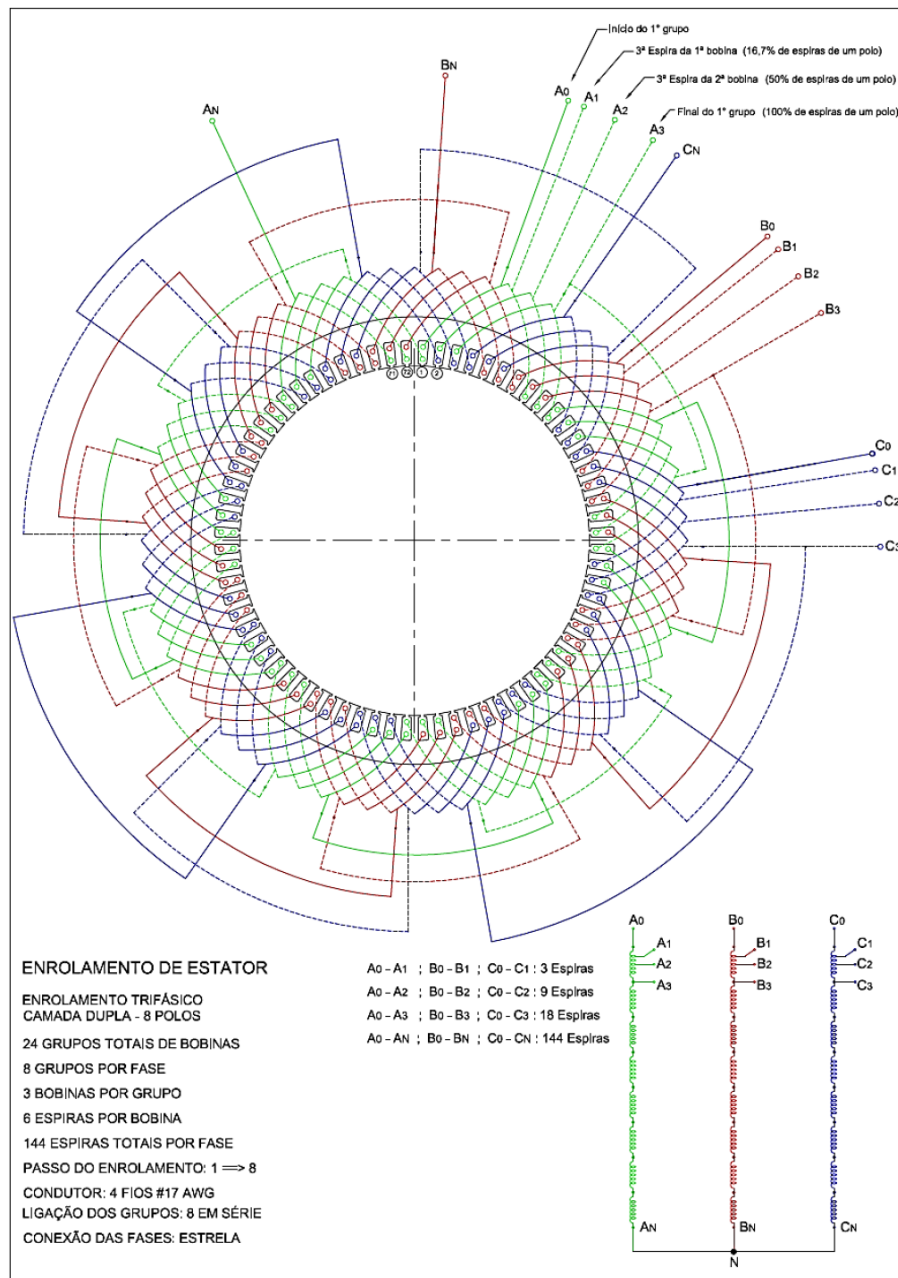
Figura 34 – Esquema para retirada de espiras de um polo do rotor.



Fonte: Equacional (2014).

Para a retirada de espiras de um polo do estator (perda de espiras no enrolamento de armadura), tem-se o diagrama mostrado na Figura 35. O funcionamento para imposição da falta é idêntico ao de retirada de espiras do rotor. Neste caso, pode-se inserir o defeito em qualquer uma das três fases (aqui descritas como A, B e C).

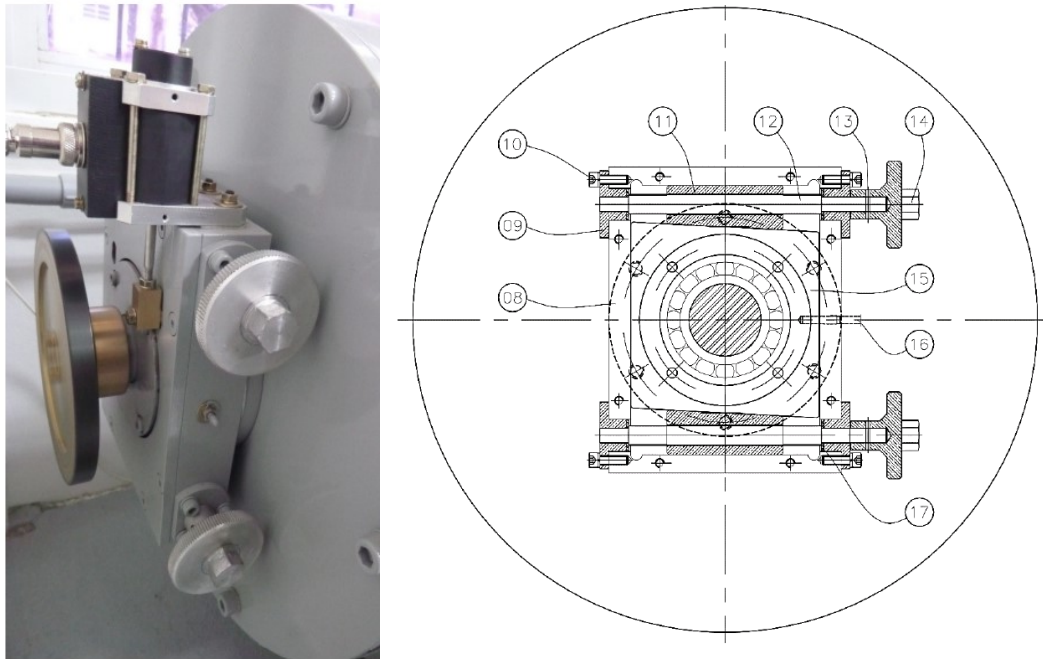
Figura 35 – Esquema para retirada de espiras de um polo do estator.



Fonte: Equacional (2014).

Para realizar a inserção de excentricidades estáticas é necessário deslocar o eixo do rotor. Na bancada de testes isso é feito através de um mancal deslizante, como mostra a foto e o esquema da Figura 36. O mancal deslizante (15) é travado pelos manípulos inferior e superior (14), através dos quais é possível movimenta-lo de maneira a causar um deslocamento positivo (para cima) ou um deslocamento negativo (para baixo) no eixo do gerador. O nível de deslocamento é medido através de transdutores de posição com auxílio de um medidor de excentricidade (vide Figura 32).

Figura 36 – Esquema para excentricidade estática.

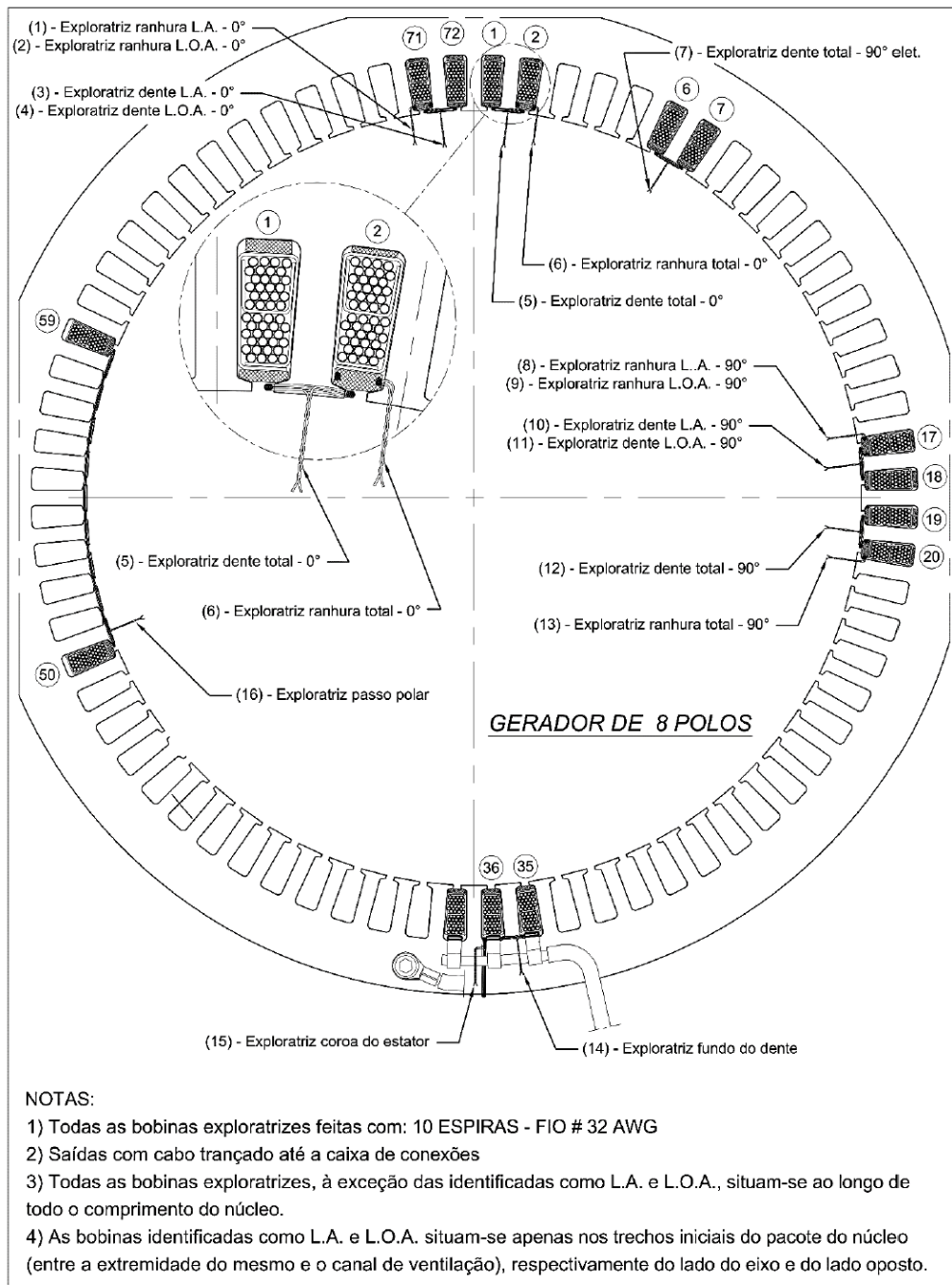


Fonte: Equacional (2014).

A manobra de deslocamento do eixo pode ser realizada tanto no Lado Acoplado (LA) à máquina primária quanto no Lado Não Acoplado (LNA). Os valores de deslocamento podem ser distintos para o LA e LNA. O entreferro do gerador síncrono de 8 polos é de 2 milímetros e o sistema permite a imposição segura de deslocamentos de até 1 milímetro, ou seja, é possível impor excentricidades de até 50% do tamanho do entreferro. Os diagramas para realização das demais faltas não serão apresentados, pois o presente trabalho abordará apenas os defeitos descritos no capítulo 3.

A Figura 37 fornece um diagrama de todas as bobinas exploratórias (definidas como exploratrizes) presentes no interior da máquina elétrica. Todos esses sensores foram testados e verificou-se o funcionamento correto dos mesmos através de medidas utilizando osciloscópio.

Figura 37 – Bobinas exploratórias presentes na máquina de 8 polos.

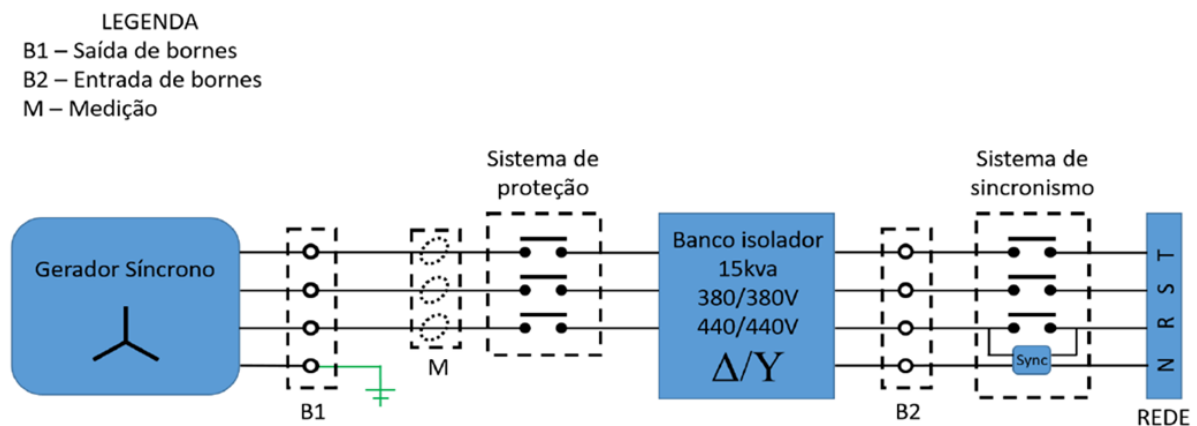


Fonte: Equacional (2014).

Este trabalho foca na detecção de faltas incipientes através de sensores de fluxo magnético posicionados nos dentes do estator que se situam ao longo de todo o núcleo. Assim, as bobinas exploratórias utilizadas neste trabalho, de acordo com a Figura 37, são (5), (7), (12) e (14). Durante os testes com osciloscópio, observou-se que essas exploratrizes apresentam tensões na faixa de 6 V com o gerador operando à vazio em 60 Hz e 380 V. Logo, o sistema de medição deve suportar tensões dessa ordem de grandeza.

Por fim, além da possibilidade de imposição controlada de faltas, a bancada de testes permite a operação do gerador em sincronismo com a rede elétrica. A conexão com a rede de distribuição é feita através de um banco de transformadores monofásicos isoladores conectados na configuração Δ -Y, como mostra o diagrama da Figura 38. Esse banco de transformadores opera também como um filtro de 3ª harmônica.

Figura 38 – Conexão gerador, transformador e rede.



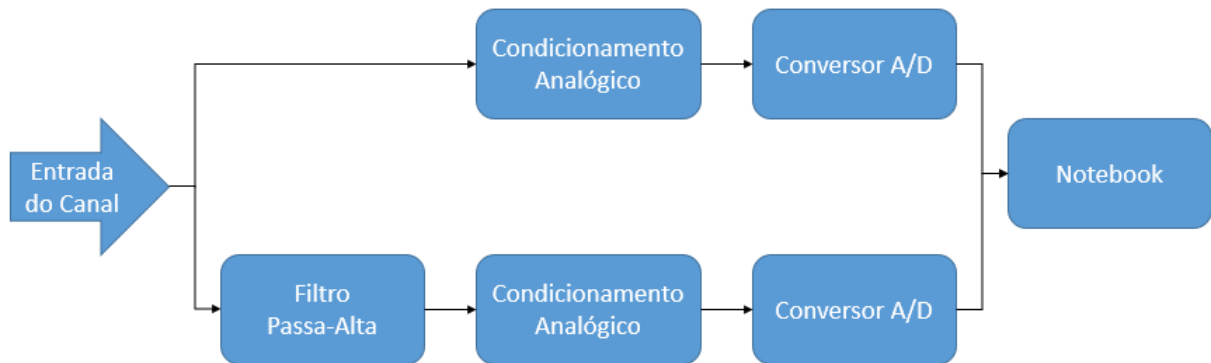
Fonte: Autor.

4.3 DISPOSITIVO DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS

Os sinais de fluxo magnético são medidos por uma maleta que contém em seu interior sistemas de condicionamento e aquisição de sinais. A maleta foi construída neste trabalho com base no equipamento desenvolvido por Santos (2016) e emprega circuitos de condicionamento semelhantes aos do equipamento MagAnalyzer e uma placa de aquisição da empresa National Instruments.

A metodologia do sistema de medição foi mantida a mesma do equipamento anterior, empregado para medir campos magnéticos externos em Santos (2021), no qual o sinal de cada canal (sinal provindo de um sensor) percorre dois caminhos distintos, como mostra a Figura 39. O primeiro caminho consiste de um circuito de condicionamento analógico com conversor analógico digital. O segundo é similar ao anterior, com a adição de um filtro passa-alta que tem como principal objetivo atenuar a componente fundamental elétrica e suas harmônicas ímpares de baixa ordem (menores que 1000 Hz). Isto permite que o circuito de condicionamento forneça ampliações maiores para a parcela de alta frequência do espectro (maior que 1000 Hz), visto que a frequência fundamental elétrica é a componente com maior amplitude e acaba ditando o ganho máximo do primeiro caminho.

Figura 39 – Topologia de um canal do sistema.



Fonte: Autor.

Na parcela de condicionamento analógico, os circuitos eletrônicos foram atualizados, nesta versão portátil semelhante ao do equipamento fixo MagAnalyzer, por componentes de desempenho similar ou superior em relação à injeção de distorção e Taxa de Rejeição de Modo Comum (CMRR, do inglês *Common Mode Rejection Ratio*). A topologia do filtro passa-alta foi alterada de um filtro passivo de 4ª ordem para um filtro ativo de 3º ordem do tipo Sallen-Key. A conversão analógica para digital era feita por uma placa da *National Instruments* (NI) do modelo USB 6259, e foi substituída por uma do modelo USB 6361 BNC. A comparação dos dois sistemas é mostrada na Tabela II.

Tabela II – Comparação sistema de medição antigo e novo.

Variável	Sistema Antigo	Sistema Novo
Condicionamento Analógico	Pré-Amplificador + Amplificador Instrumentação + Filtro Anti-Recobrimento	Pré-Amplificador + Amplificador Instrumentação + Filtro Anti-Recobrimento
Filtro Passa-Alta	Filtro Passivo 4ª Ordem	Filtro Ativo 3ª Ordem Sallen-Key
Amplificação	1875 (Fixo)	10, 100, 1000 e 10000
Resolução do A/D	16 Bits	16 Bits
Taxa de Amostragem Máxima por Canal	62,5 kHz	125 kHz
Tensões Máximas	±5 V	±5 V

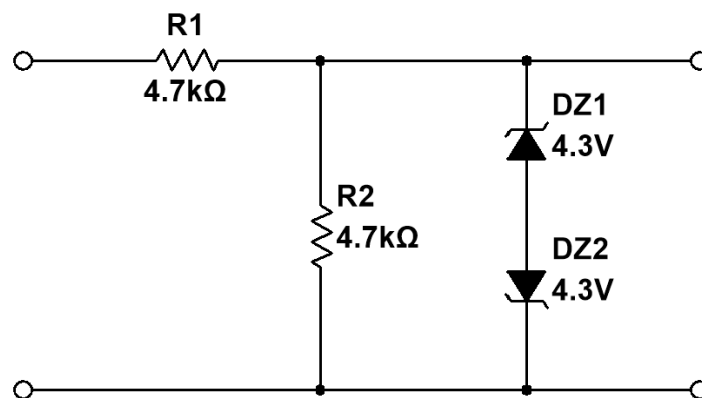
Fonte: Autor.

Além da alteração dos componentes eletrônicos, a blindagem do sistema foi feita através de uma caixa de alumínio, e utilizou-se de cabos coaxiais nas conexões internas do sistema, em contraste ao sistema antigo que utilizava um revestimento de papel alumínio em

toda a maleta (Santos, 2016). O tamanho do equipamento foi também reduzido para cerca de 2/3 em relação ao sistema antigo e o número de canais foi mantido em 4. O *software* presente no computador para leitura e salvamento de dados (desenvolvido em *LabVIEW*) foi também atualizado. Aprimorou-se a visualização dos dados e aumentou-se a quantidade de variáveis que o usuário pode controlar, como por exemplo a taxa de amostragem, tempo de aquisição, opções de salvamento, notas do ensaio etc. É possível afirmar que o novo sistema de condicionamento e aquisição de sinais desenvolvido é capaz de suprir a demanda não só para o presente trabalho, mas também para os demais que virão no GRUCAD.

Em específico para este trabalho, apontou-se no fim da sessão 4.2 que a tensão nos terminais dos sensores a serem utilizados é na faixa dos 6 V, ou seja, é necessário realizar uma redução da tensão para atender os limites do conversor A/D da placa de aquisição (vide Tabela II). Neste caso, o circuito de amplificação (Pré-amplificador + amplificador de instrumentação) foi substituído pelo circuito eletrônico divisor de tensão com proteção para os 4 canais, apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Circuito para ajuste da tensão.



Fonte: Autor.

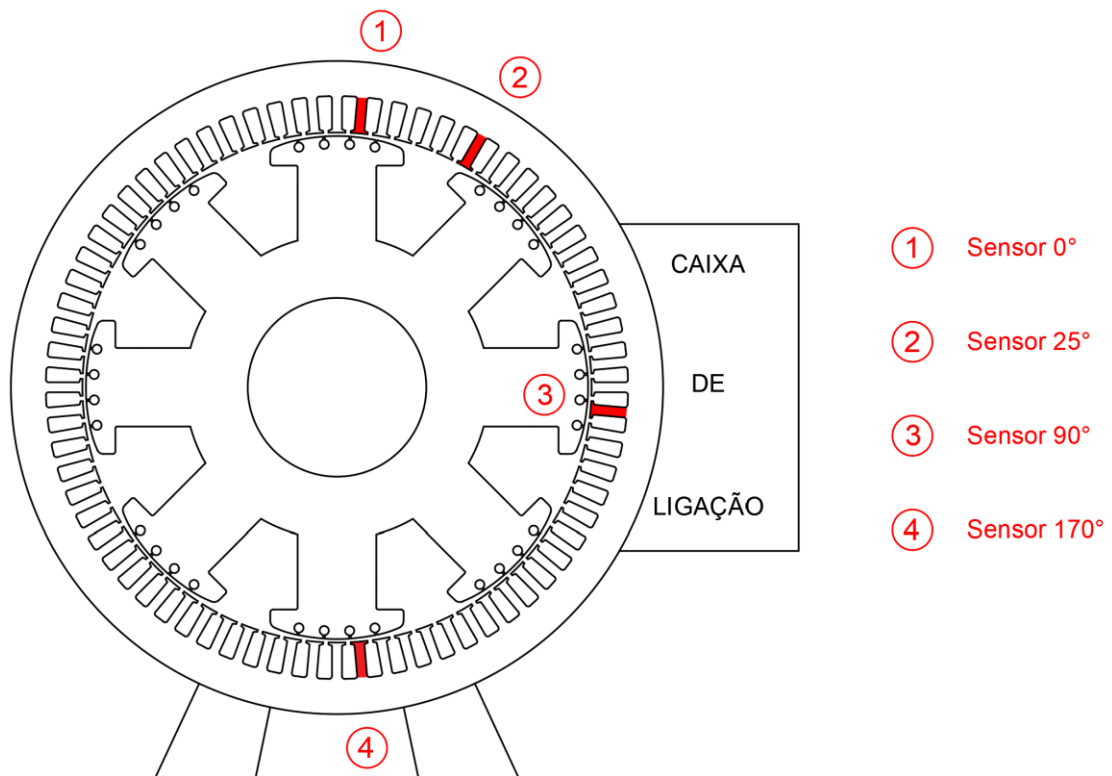
Como pode ser visto na Figura 40, o circuito mostrado é um divisor resistivo que reduz a tensão lida para metade do seu valor original. Os valores dos resistores foram escolhidos de forma a ter uma corrente mínima circulando no circuito, porém não muito elevada de maneira a prejudicar o funcionamento dos transdutores, pois os sensores não têm função/capacidade de fornecer potência. Os diodos zener foram colocados para proteger a placa de aquisição de algum possível surto de tensão.

Em relação ao filtro passa-alta, esse não será utilizado neste trabalho, pois a porção do conteúdo de componentes de frequência do espectro até 1000 Hz é suficiente para a aplicação das estratégias propostas no capítulo 3.

4.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios experimentais foram feitos no gerador síncrono trifásico de 8 polos salientes operando em sincronismo com a rede de distribuição elétrica 60 Hz, 380 V de Florianópolis, no Estado de Santa Catarina. A conexão do gerador é feita através de um banco de transformadores na configuração Δ -Y, como já mencionado. Um motor de corrente contínua de excitação independente é utilizado como máquina motriz para o gerador. São monitorados e gravados os sinais provindos de quatro sensores de fluxo magnético de entreferro posicionados nos dentes do estator, mais especificamente nos dentes hachurados em vermelho na Figura 41.

Figura 41 – Posicionamento dos sensores de fluxo magnético de entreferro.



Fonte: Autor.

Em relação ao carregamento, são realizados ensaios em 21 pontos de operação distintos, os quais são especificados na Tabela III. Em todos eles, uma carga local de lâmpadas

incandescentes de cerca de 900 W é utilizada para impedir que a máquina dispare em caso de perda de sincronismo com a rede elétrica (rejeição de carga).

Tabela III – Pontos de operação dos ensaios realizados.

Ponto de Operação	Potência Aparente	Fator de Potência
P1	4,5 kVA	1
P2	4,5 kVA	0,8 indutivo
P3	4,5 kVA	0,5 indutivo
P4	4,5 kVA	0,3 indutivo
P5	4,5 kVA	0,8 capacitivo
P6	4,5 kVA	0,5 capacitivo
P7	4,5 kVA	0,3 capacitivo
P8	3 kVA	1
P9	3 kVA	0,8 indutivo
P10	3 kVA	0,5 indutivo
P11	3 kVA	0,3 indutivo
P12	3 kVA	0,8 capacitivo
P13	3 kVA	0,5 capacitivo
P14	3 kVA	0,3 capacitivo
P15	7 kVA	1
P16	7 kVA	0,8 indutivo
P17	7 kVA	0,5 indutivo
P18	7 kVA	0,3 indutivo
P19	7 kVA	0,8 capacitivo
P20	7 kVA	0,5 capacitivo
P21	7 kVA	0,3 capacitivo

Fonte: Autor.

Após atingir o ponto de operação do ensaio, espera-se cerca de uma hora para que a bancada (gerador + motor) atinja o regime térmico e após isso se iniciam os experimentos. Todos os pontos de carregamentos da Tabela III respeitam a curva de capacidade do gerador. O limite de potência aparente foi escolhido como 7 kVA, pois a máxima potência que a máquina primária pode fornecer é de 7 kW (limitado pelo sistema de proteção da bancada). O menor valor de potência aparente 3 kVA fornece 900 W de potência ativa quando operando no menor fator de potência (0,3). Esse limite foi escolhido para não haver riscos de motorização do gerador durante a aplicação de faltas. As tensões das três fases, as correntes das três fases, a potência ativa, reativa e aparente e a corrente de excitação do gerador são também monitoradas, medidas e armazenadas.

Para cada ponto de operação mostrado na Tabela III, realizou-se a imposição controlada das faltas mostradas na Tabela IV. Os defeitos inseridos nos ensaios de F1 a F4 são colocados com o gerador em operação (seção 4.2). Para os ensaios de F6 a F9, utilizou-se a

convenção que valores positivos representam um deslocamento do eixo para cima em relação ao ponto de alinhamento, e valores negativos para deslocamentos para baixo. Os ensaios F5 e F10 consistem do gerador operando normalmente (de forma sadia) e tem a finalidade de atuarem como referências para os ensaios de F6 a F9.

Tabela IV – Ensaios de imposição de falta.

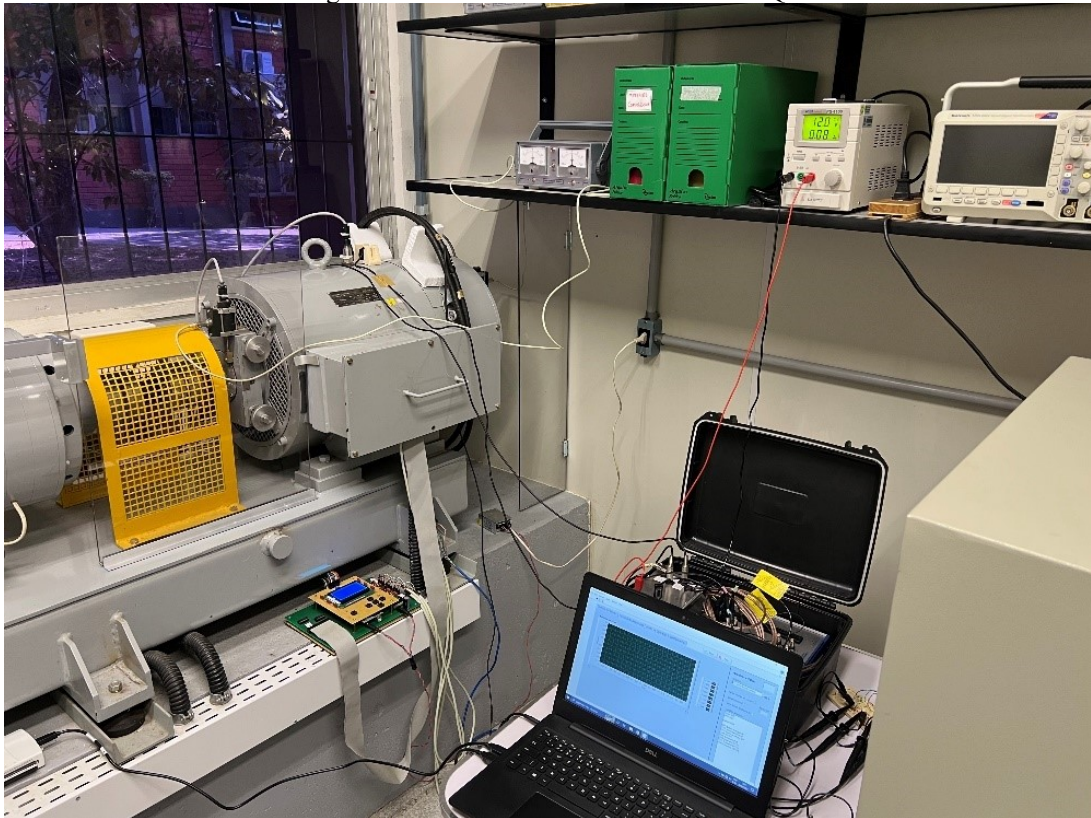
Ensaio	Descrição	Condições
F1	Perda de Espiras em 1 Polo do Rotor	Sadia → Falta Leve → Falta Moderada → Falta Grave → Sadia
F2	Perda de Espiras na Fase A	Sadia → Falta Leve → Falta Moderada → Sadia
F3	Perda de Espiras na Fase B	Sadia → Falta Leve → Falta Moderada → Sadia
F4	Perda de Espiras na Fase C	Sadia → Falta Leve → Falta Moderada → Sadia
F5	Sadia Pré Excentricidade Estática	Eixo Alinhado (Sadia)
F6	Excentricidade Estática	Eixo Deslocado de 0,5 mm (25%) no LA e 0,5 mm (25%) no LNA
F7	Excentricidade Estática	Eixo Deslocado de -0,5 mm (25%) no LA e -0,5 mm (25%) no LNA
F8	Excentricidade Estática	Eixo Deslocado de -0,5 mm (25%) no LA e 0,5 mm (25%) no LNA
F9	Excentricidade Estática	Eixo Deslocado de -1 mm (50%) no LA e alinhado no LNA
F10	Sadia Pós Excentricidade Estática	Eixo Alinhado (Sadia)

Fonte: Autor.

Para os ensaios de perda de espiras no enrolamento de armadura (F2, F3 e F4) foram impostos apenas defeitos leves e moderados, visto que essa falta provoca um alto desbalanceamento das correntes do gerador (quando este está conectado à rede elétrica). Além disso, para potências mais elevadas não seria possível controlar se a corrente de uma determinada fase assumiria valores acima dos nominais da máquina.

O sinal proveniente das bobinas exploratórias é adquirido de forma simultânea (os 4 ao mesmo tempo) através do equipamento descrito na seção anterior. A frequência de amostragem é 125 kHz e o tempo por aquisição é de 10 segundos. Para os ensaios com mais de uma condição (F1 a F4, na Tabela IV) são realizadas aproximadamente 20 aquisições por condição. Assim, foram realizados 210 ensaios (os 10 tipos de ensaios descritos na Tabela IV nos 21 pontos de operação da Tabela III), cerca de 12.000 aquisições e se obteve aproximadamente 2 TB de dados. A Figura 42 mostra uma fotografia do sistema em um ensaio no LABMAQ.

Figura 42 – Foto de um ensaio no LABMAQ.



Fonte: Autor.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo 4 descreveu o funcionamento dos sensores de fluxo magnético de entreferro, detalhou a bancada de testes presente no LABMAQ da UFSC, expôs o equipamento utilizado para condicionamento e aquisição dos sinais dos transdutores e apresentou características dos ensaios experimentais realizados.

O próximo capítulo tem como objetivo expor as análises feitas a partir dos dados coletados e discutir os resultados obtidos com as estratégias de detecção apresentadas no capítulo 3.

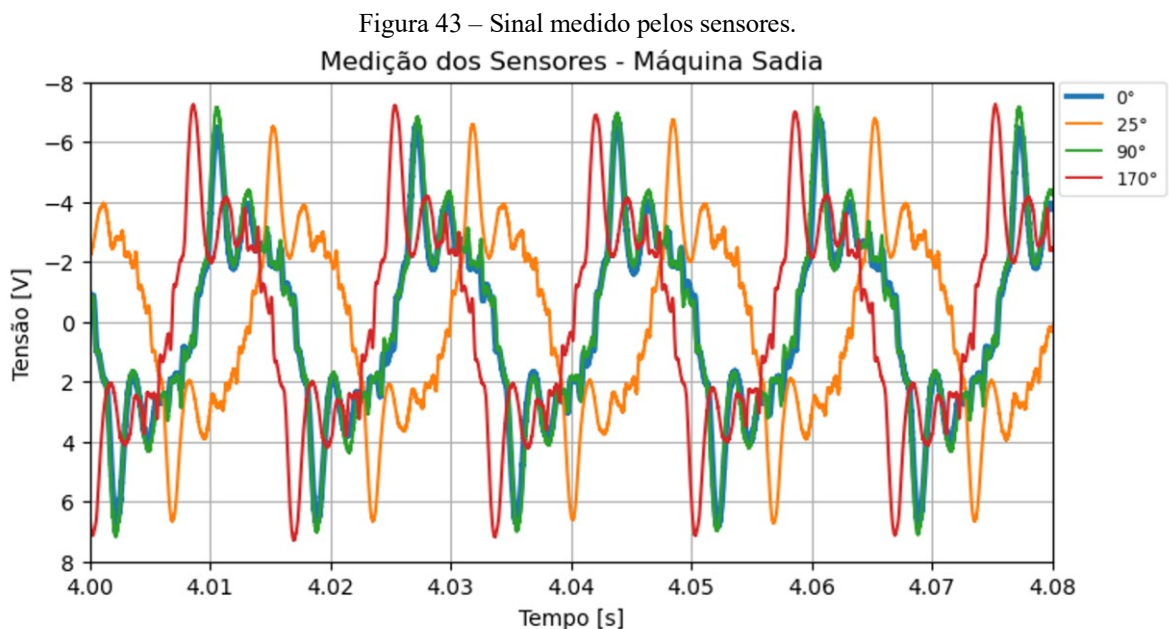
5 ANÁLISES E RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO

O presente capítulo aborda as análises e os resultados obtidos da aplicação das estratégias de detecção, detalhadas no capítulo 3, aos dados provindos dos ensaios descritos no capítulo 4. Para realizar as operações de processamento de dados, programou-se utilizando linguagem Python.

5.1 CONSTRUÇÃO DOS HISTÓRICOS DE AMPLITUDES

Para as estratégias de detecção de perda de espiras no enrolamento de excitação e de perda de espiras na armadura, o principal elemento envolvido é a construção dos históricos de amplitude das componentes harmônicas presentes no espectro em frequência do fluxo magnético de entreferro.

O processo de construção destes históricos de amplitude começa com os sinais de tensão provenientes dos quatro sensores internos à máquina (vide Figura 41) adquiridos pelo equipamento de condicionamento e de aquisição. As formas de onda obtidas para o gerador operando de forma sadia, com potência aparente de 4,5 kVA e fator de potência unitário, são mostradas na Figura 43.

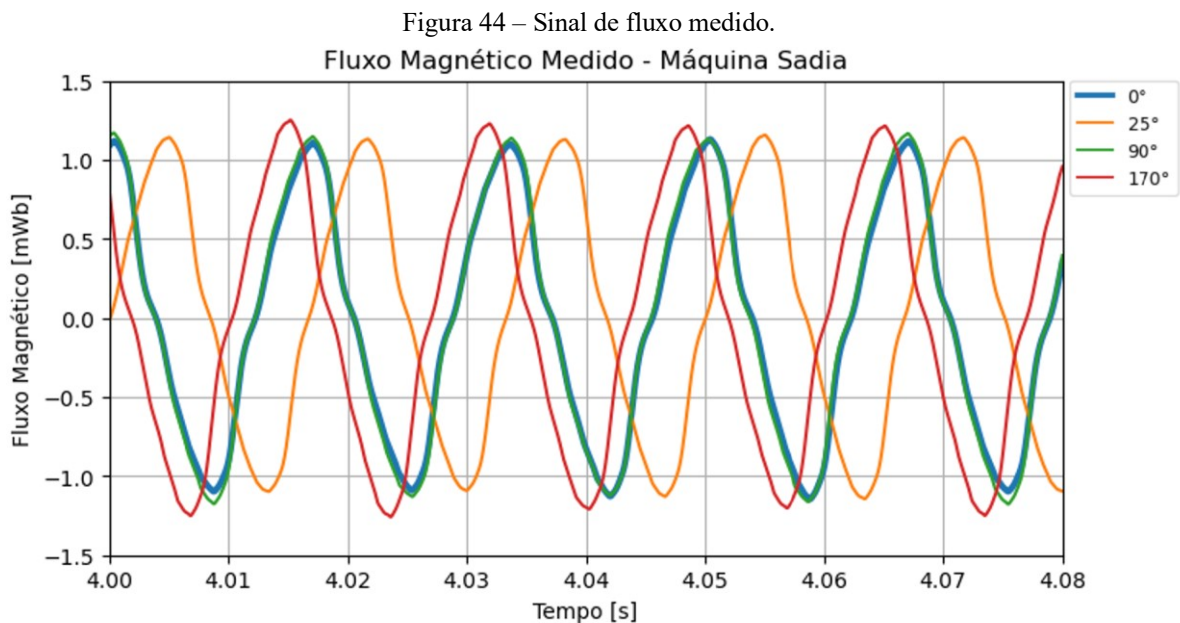


Fonte: Autor.

Primeiramente, observa-se que os sensores posicionados a 0° e 90° possuem uma forma de onda de tensão muito similar e praticamente em fase. Isso ocorre devido ao número

de polos da máquina ser igual a 8, de modo que um ciclo elétrico completo é realizado a cada 90° mecânicos. O sensor a 25° possui uma defasagem de aproximadamente 90° em relação ao sensor a 0° , visto que 90° elétricos correspondem a $22,5^\circ$ mecânicos. O transdutor a 170° está levemente adiantado em relação ao de 0° . Caso o sensor estivesse a 180° estaria teoricamente em fase.

Como indicado em (4.1), essas tensões são proporcionais à derivada do fluxo magnético, ou seja, é necessário realizar uma integração numérica do sinal e aplicar o número de espiras do transdutor, conforme (4.2), para obter a grandeza fluxo magnético que se deseja analisar. Realizando essas operações, obteve-se o sinal mostrado na Figura 44. Como esperado, nota-se que os sinais possuem um formato mais sinusoidal e se assemelham às ondas de fluxo interno mostradas na literatura (FITZGERALD, 2014).

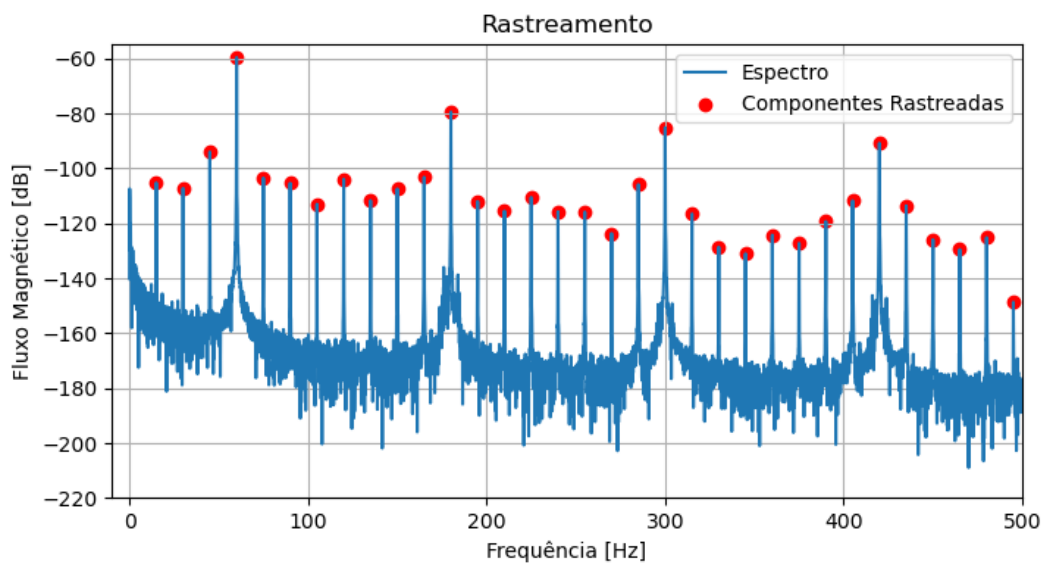


Fonte: Autor.

O próximo passo é realizar a FFT do sinal e monitorar as componentes de interesse. A operação de encontrar essas harmônicas específicas é comumente chamada de rastreamento espectral. Esse rastreamento pode ser uma atividade complexa, dependendo dos níveis de amplitude do sinal, do ruído ambiente, da variação de velocidade da máquina e da maior frequência que se deseja rastrear (SANTOS, 2021; GRILLO, 2022). O processo de rastreamento espectral deste trabalho consistiu de encontrar a frequência de rotação do gerador, que é o valor máximo na FFT nas proximidades de 15 Hz, e descobrir as demais componentes utilizando múltiplos da frequência de giro mecânica encontrada. Por exemplo, se a frequência

de rotação encontrada é de 15,2 Hz, procura-se a segunda harmônica nas proximidades de 30,4 Hz, a terceira harmônica nas redondezas de 45,6 Hz e assim por diante. Apesar de aparentar pouca diferença, à medida que a componente harmônica aumenta de ordem, o erro torna-se significativo. Por exemplo, para a componente de ordem 100 (1500 Hz) com um desvio de 0,2 Hz na frequência de rotação, a harmônica estaria em 1520 Hz, a qual poderia ser confundida com a componente de ordem 101 (1515 Hz). Aplicando essa metodologia no espectro em frequência do sinal de fluxo da Figura 44, obtém-se o resultado mostrado na Figura 45. Pelo resultado, infere-se que a operação de rastreamento é realizada com sucesso.

Figura 45 – Operação de rastreamento do espectro.

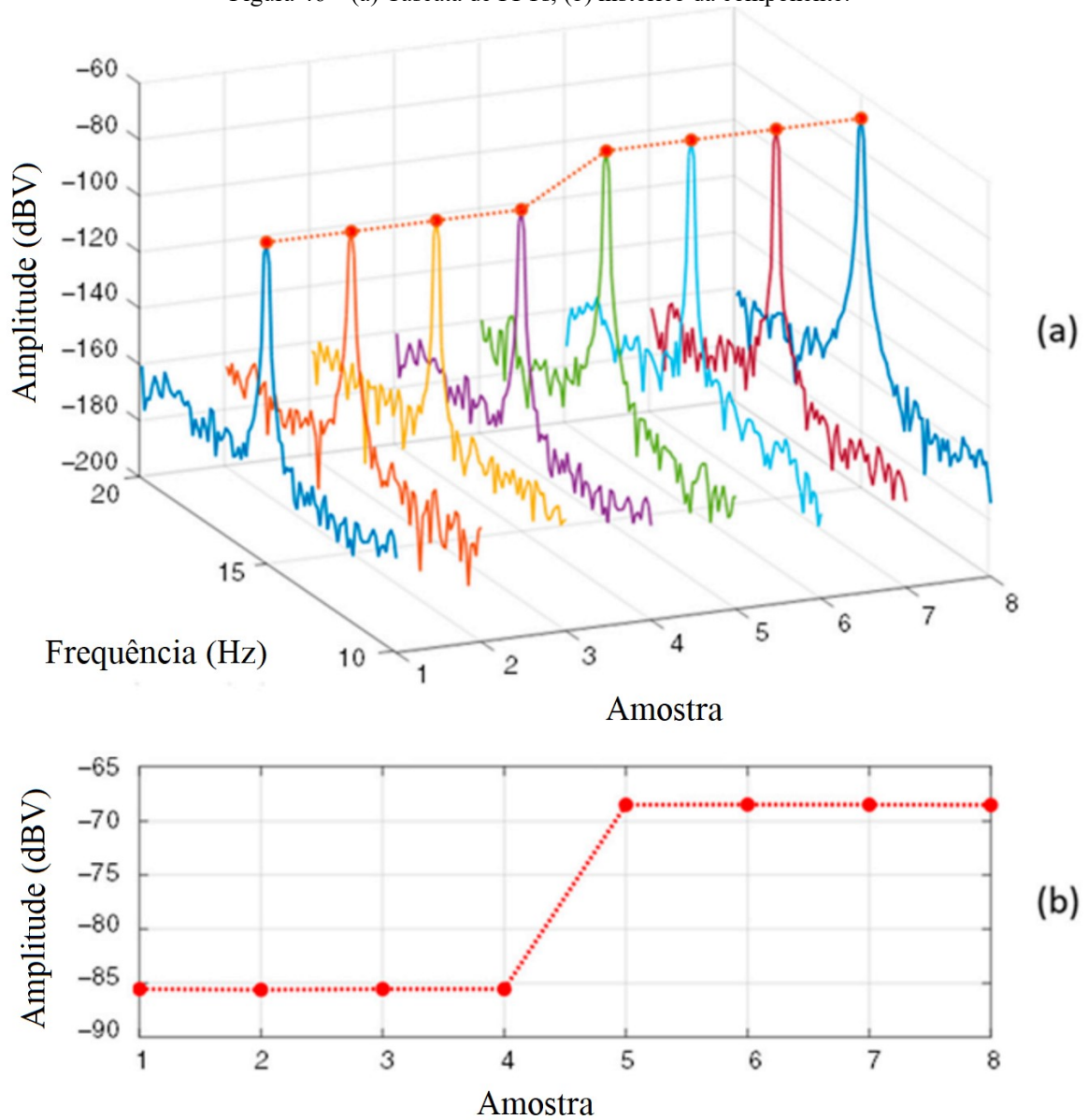


Fonte: Autor.

O último passo para a criação de um histórico de amplitudes é aplicar as operações anteriores para cada aquisição realizada pelo equipamento. Tem-se então uma cascata de FFTs e rastreia-se a componente de interesse em todas elas, como mostra a Figura 46 (a). A partir dessa cascata, traça-se uma curva da amplitude da harmônica rastreada em função das amostras (das aquisições), como mostrado na Figura 46 (b). Esse processo é repetido para as demais componentes harmônicas (30 Hz, 45 Hz, 60 Hz e assim por diante). Feito isso, tem-se finalmente o histórico de amplitudes de uma componente harmônica espectral em função das aquisições do fluxo magnético de entreferro.

Uma vez descrito em detalhes a metodologia para obtenção dos históricos de amplitudes, é possível começar a aplicação das estratégias de detecção para as faltas de perda de espiras no rotor e no estator e para excentricidade estática.

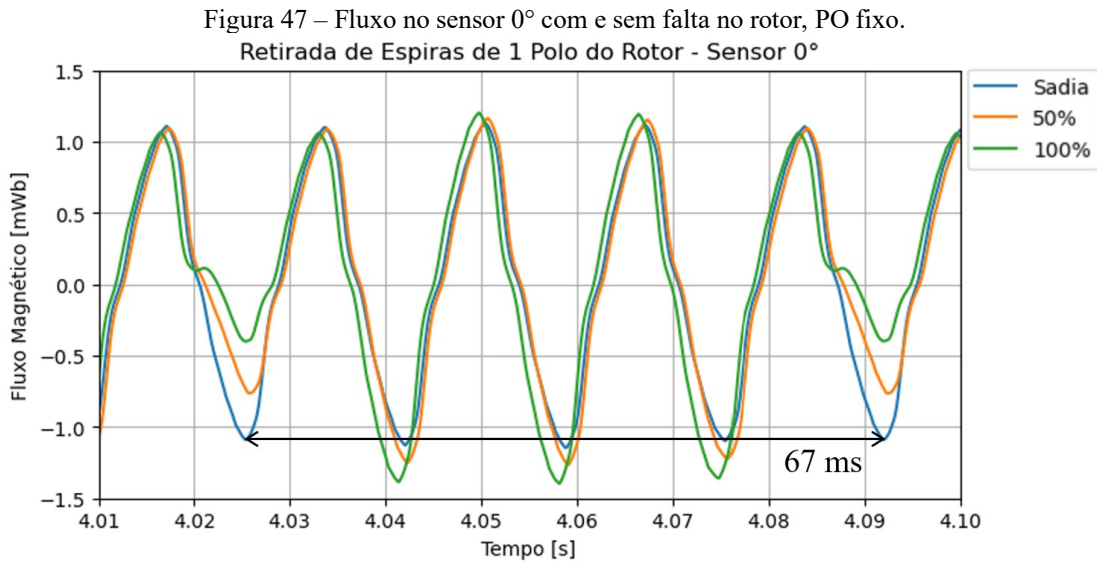
Figura 46 – (a) Cascata de FFTs, (b) histórico da componente.



Fonte: (GRILLO, 2022).

5.2 DETECÇÃO DE PERDA DE ESPIRAS EM POLO DO ROTOR

Primeiramente, analisa-se o comportamento da inserção da perda de espiras em um polo do rotor para um ponto de operação (PO) fixo e, então, posteriormente investiga-se uma correlação para os demais carregamentos. Uma primeira análise considerou a máquina operando a 4,5 kVA e fator de potência unitário. A Figura 47 apresenta a forma de onda do fluxo medida pelo sensor posicionado em 0° para três condições: máquina sadia, com perda de 50% (falta moderada) e 100% (falta grave) das espiras de um polo do rotor.

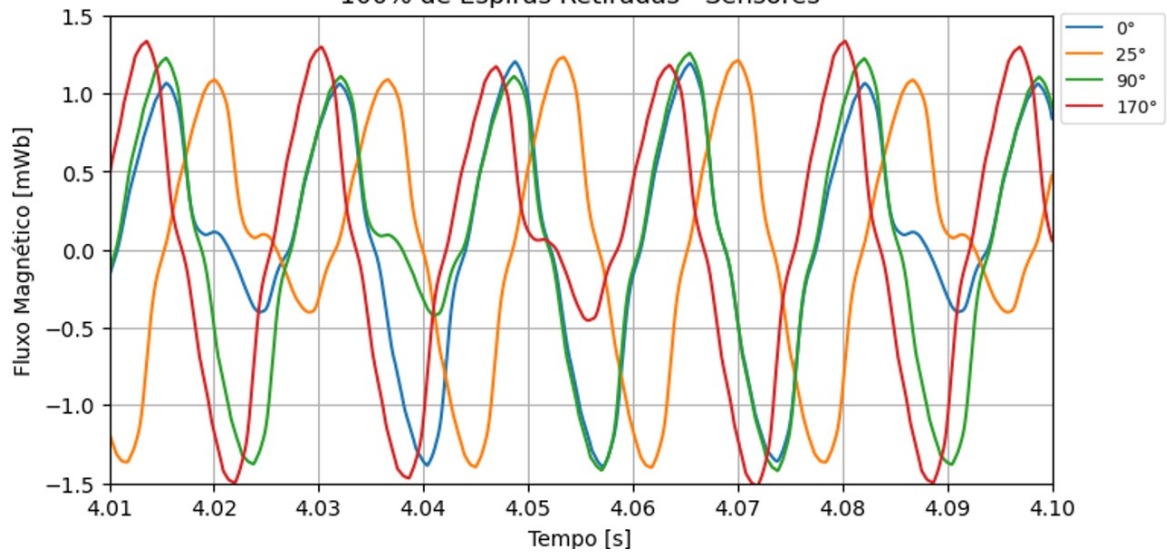


Fonte: Autor.

Nota-se, pelas formas de onda da Figura 47, que a inserção do defeito provoca uma alteração severa em um semiciclo elétrico (entre 4,02 e 4,03 segundos), diminuindo a sua amplitude em comparação às demais. Esse efeito ocorre novamente entre os instantes 4,09 e 4,10 segundos e se repete com uma frequência aproximada de 15 Hz, a qual se trata da componente de giro mecânico do gerador. Com um olhar mais minucioso, principalmente na condição de falta grave, é possível ver que as amplitudes dos picos adjacentes ao do polo defeituoso também são afetadas, sendo ligeiramente menores em módulo aos demais. Esses resultados vão ao encontro do esperado e descrito na seção 3.3.1 (Figura 28) e ilustram a concepção de detecção desta falta através da análise do fluxo magnético no domínio do tempo.

No capítulo 3, pontuou-se também que esse defeito é não localizado, isto é, como o rotor encontra-se em movimento, todos os sensores devem ser capazes de detectar o problema de maneira muito semelhante. A Figura 48 apresenta a forma de onda do fluxo magnético captado pelos quatro sensores, com o gerador no ponto de operação previamente descrito e na condição de falta grave (perda de todas as espiras de um polo do rotor). Observa-se que a alteração de um semiciclo elétrico ocorre em todos os sensores, mas com uma defasagem. Essa diferença no ângulo em que ocorre a alteração está ligada ao posicionamento físico dos sensores, pois o polo defeituoso passa primeiramente pelo sensor 0°, depois pelo de 25° e assim por diante. Novamente com um olhar mais atento, identifica-se que a amplitude do sinal do sensor 170° é levemente superior aos demais, o que ocorre pelo fato de que este transdutor é o único posicionado no fundo do dente do estator, ao contrário dos demais que estão no topo do dente (vide Figura 37, exploratriz 14).

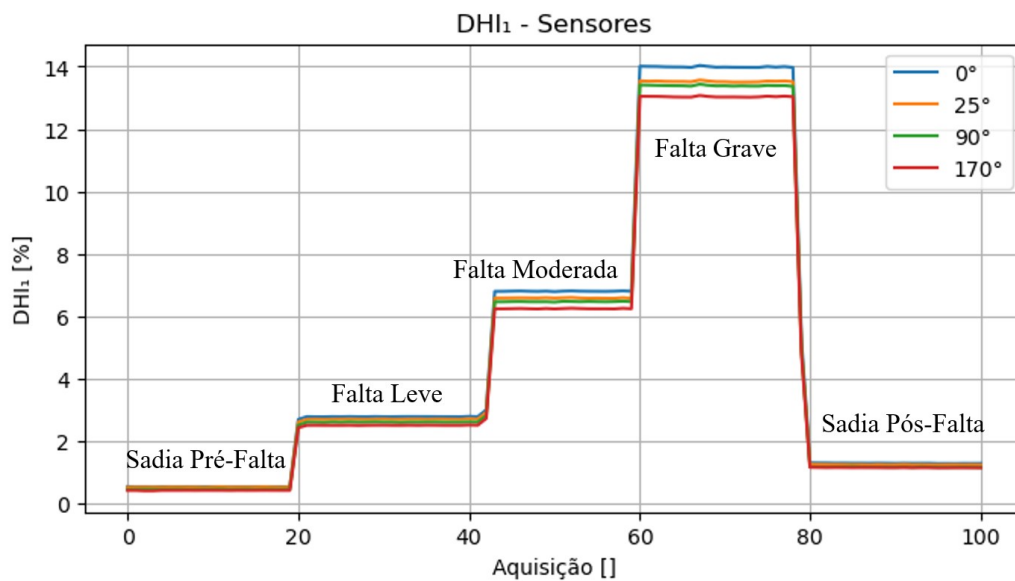
Figura 48 – Fluxo nos sensores com falta grave no rotor, PO fixo.
100% de Espiras Retiradas - Sensores



Fonte: Autor.

Para aplicação da estratégia de detecção proposta, é necessária a construção dos históricos de amplitude das componentes de 15 Hz e 60 Hz, frequência de giro mecânico e fundamental elétrica, respectivamente. Realizada essa operação (como descrito na seção 4.1), as amplitudes da harmônica de 15 Hz são normalizadas pelas de 60 Hz ponto a ponto, formando assim a distorção harmônica individual dessa componente (DHI_1) ao longo das aquisições, conforme (3.1). O resultado obtido ao longo de todo o ensaio de inserção de perda de espiras no enrolamento de excitação é mostrado na Figura 49.

Figura 49 – Histórico de amplitudes da DHI_1 , PO fixo.

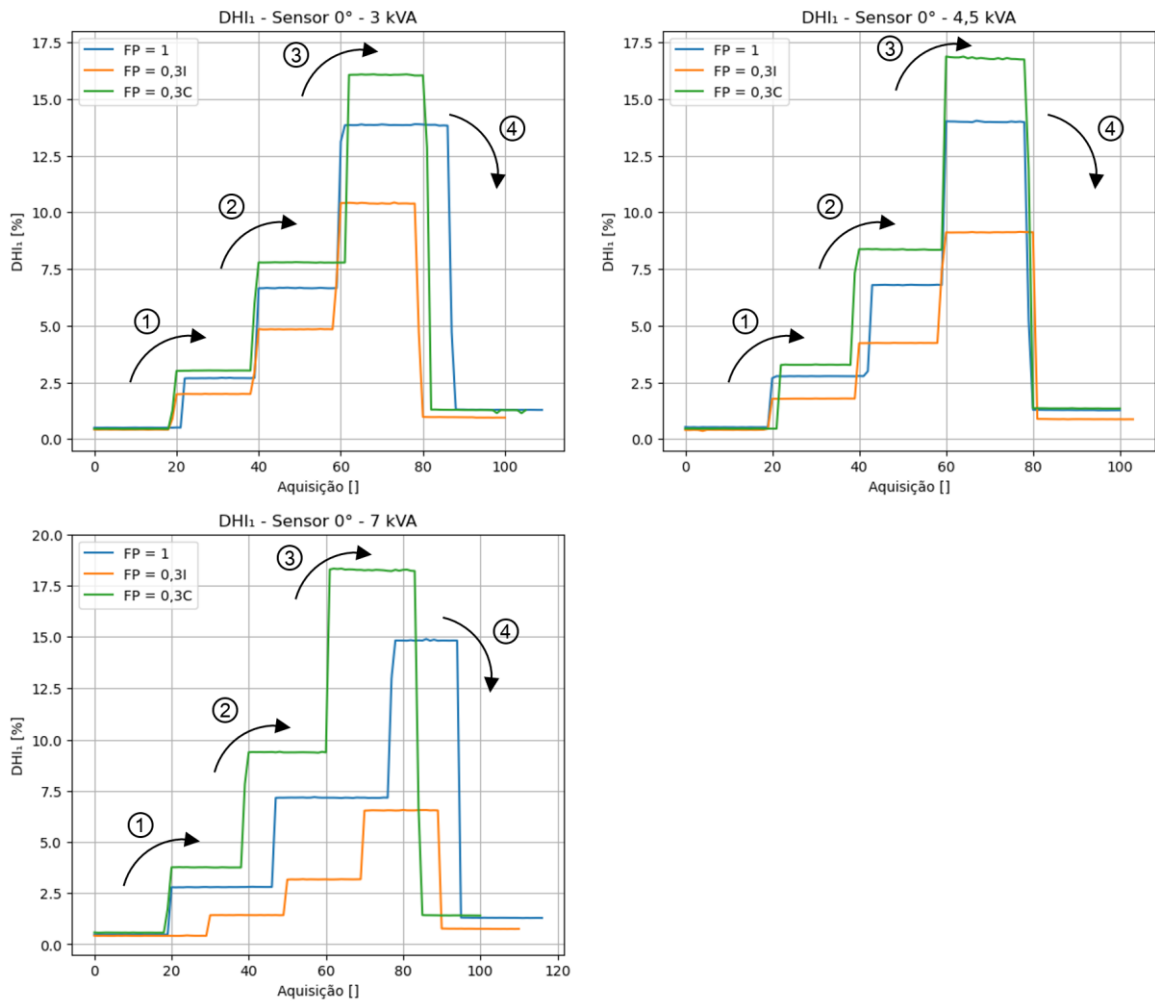


Fonte: Autor.

A partir do resultado obtido, identifica-se três características principais. Primeiramente, a inserção de todos os níveis do defeito altera consideravelmente os valores das DHI_1 nos quatro sensores, sendo os valores no estado de falta grave cerca de 35 vezes maiores do que o do caso sadio pré-falta. Todos os sensores apresentam uma resposta semelhante ao defeito, e o nível de DHI_1 entre eles varia pouco (nível de DHI_1 de 14% para o sensor 0° e 13% para o sensor 170° , na condição de falta grave). Observa-se que a DHI_1 da máquina sadia pré-falta e sadia pós-falta é consideravelmente diferente (aproximadamente o dobro), o que pode ser ocasionado por uma mudança na condição térmica da bancada, fruto de um aumento da corrente de excitação, pois a perda de espiras provoca uma redução da resistência total do enrolamento de excitação. Esses resultados indicam que a severidade da falta se manifesta nos valores da DHI_1 .

A Figura 50 fornece os valores da DHI_1 no sensor 0° , ao longo do ensaio de perda de espiras no enrolamento de excitação, para potências aparentes constantes, nos resultados apresentados em cada gráfico, e alterando o fator de potência. Cada curva apresenta um valor distinto de fator de potência. Nos gráficos, ① é a transição da condição sadia pré-falta para falta leve, ② é a transição da condição de falta leve para falta moderada, ③ é a transição da condição de falta moderada para falta grave e ④ é a transição da condição de falta grave para sadia pós-falta. É importante ressaltar que o número de aquisições por ensaio é diferente, mas isso não altera a forma das curvas, pois todos os ensaios seguem a mesma sequência de condições de operação da máquina.

Com base nos gráficos da Figura 50, vê-se que para uma potência aparente fixa, os valores da DHI_1 variam significativamente com o fator de potência. Por exemplo, para carga de 7 kVA, os valores da DHI_1 com falta grave e fator de potência 0,3 indutivo (curva $FP=0,3I$, na Figura 50) são ligeiramente maiores que a metade do nível da DHI_1 com falta moderada e fator de potência capacitivo (curva $FP=0,3C$, na Figura 50). Observa-se que para os três valores de potência aparente ensaiados, é possível visualizar um padrão: quanto mais capacitivo (curvas $FP=0,3C$, na Figura 50) está o gerador, maior são os valores da DHI_1 . Em outras palavras, quanto maior for a corrente de excitação da máquina, maior é o nível da DHI_1 e mais fácil é a detecção do defeito. Essa conclusão é coerente, pois quanto maior a corrente de excitação, maior é o fluxo magnético que o rotor produz no entreferro e de melhor maneira o sensor pode “ver” as características do rotor.

Figura 50 – DHI_1 , Sensor 0° , potência aparente fixa.

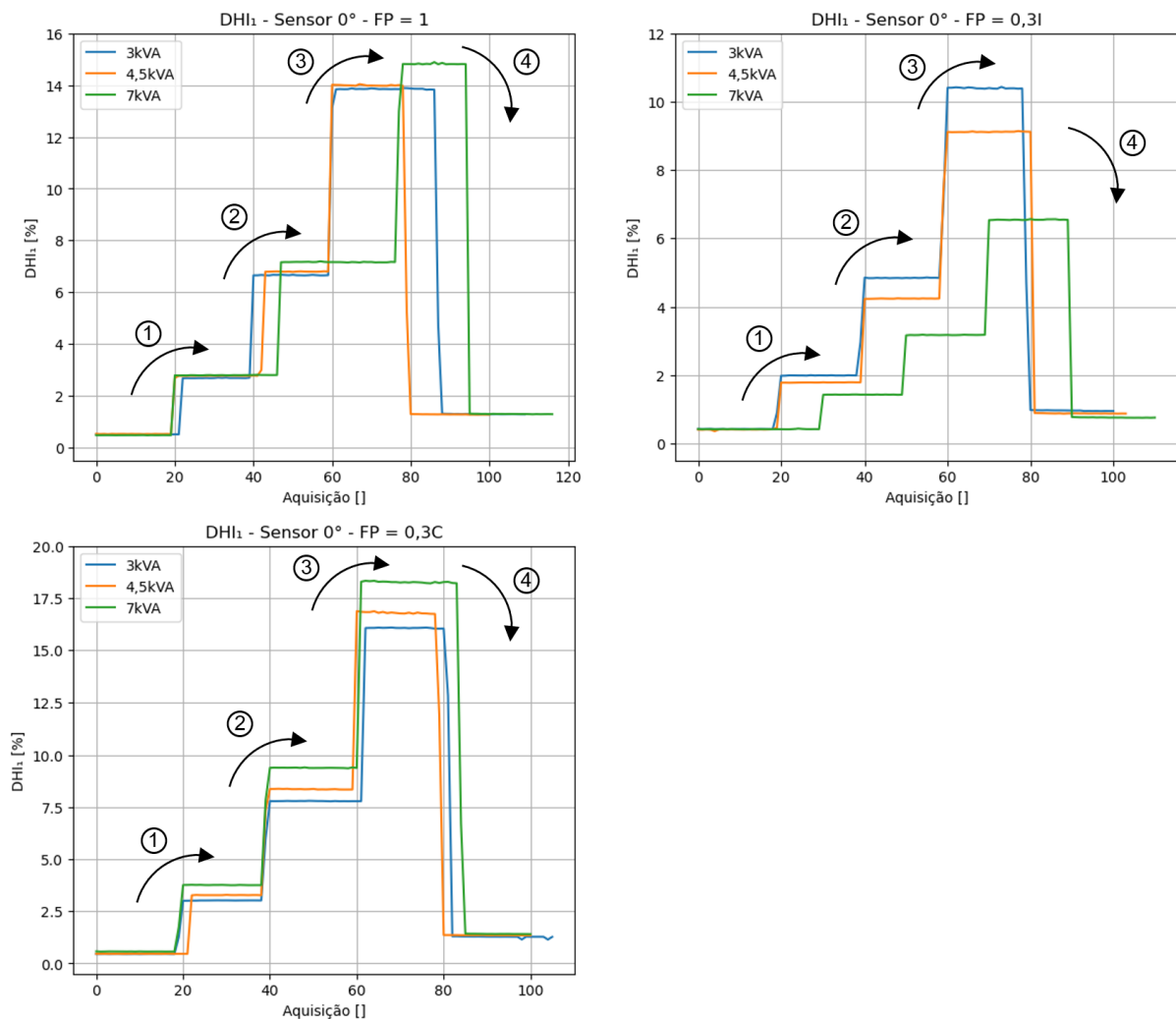
Fonte: Autor.

Com o objetivo de retirar o máximo de informação possível, retracou-se as curvas anteriores, porém agora da perspectiva de que o fator de potência é mantido constante no resultado apresentado em cada gráfico e a potência aparente é alterada em cada curva. Essas novas curvas são apresentadas na Figura 51. Nos gráficos, ① é a transição da condição sadia pré-falta para falta leve, ② é a transição da condição de falta leve para falta moderada, ③ é a transição da condição de falta moderada para falta grave e ④ é a transição da condição de falta grave para sadia pós-falta. É importante ressaltar que o número de aquisições por ensaio é diferente, mas isso não altera a forma das curvas, pois todos os ensaios seguem a mesma sequência de condições de operação da máquina.

Para os gráficos de $FP = 1$ e $FP = 0,3C$ da Figura 51, nota-se que os valores de DHI_1 de cada condição não variam significativamente com a alteração da potência aparente. Contudo, para o gráfico de $FP = 0,3I$, o nível de DHI_1 de cada condição é expressivamente diferente na

curva de 7 kVA, quando comparada as curvas de 3 kVA e 4,5 kVA. O carregamento de 7 kVA e FP 0,3 indutivo possui o menor valor de corrente de excitação, e apresenta os menores níveis de DHI_1 entre todos os pontos de operação ensaiados. Além disso, a variação percentual do valor da corrente de excitação é maior quando a potência aparente é alterada com o fator de potência 0,3 indutivo, quando comparada aos demais FPs.

Figura 51 – DHI_1 , Sensor 0° , fator de potência fixo.

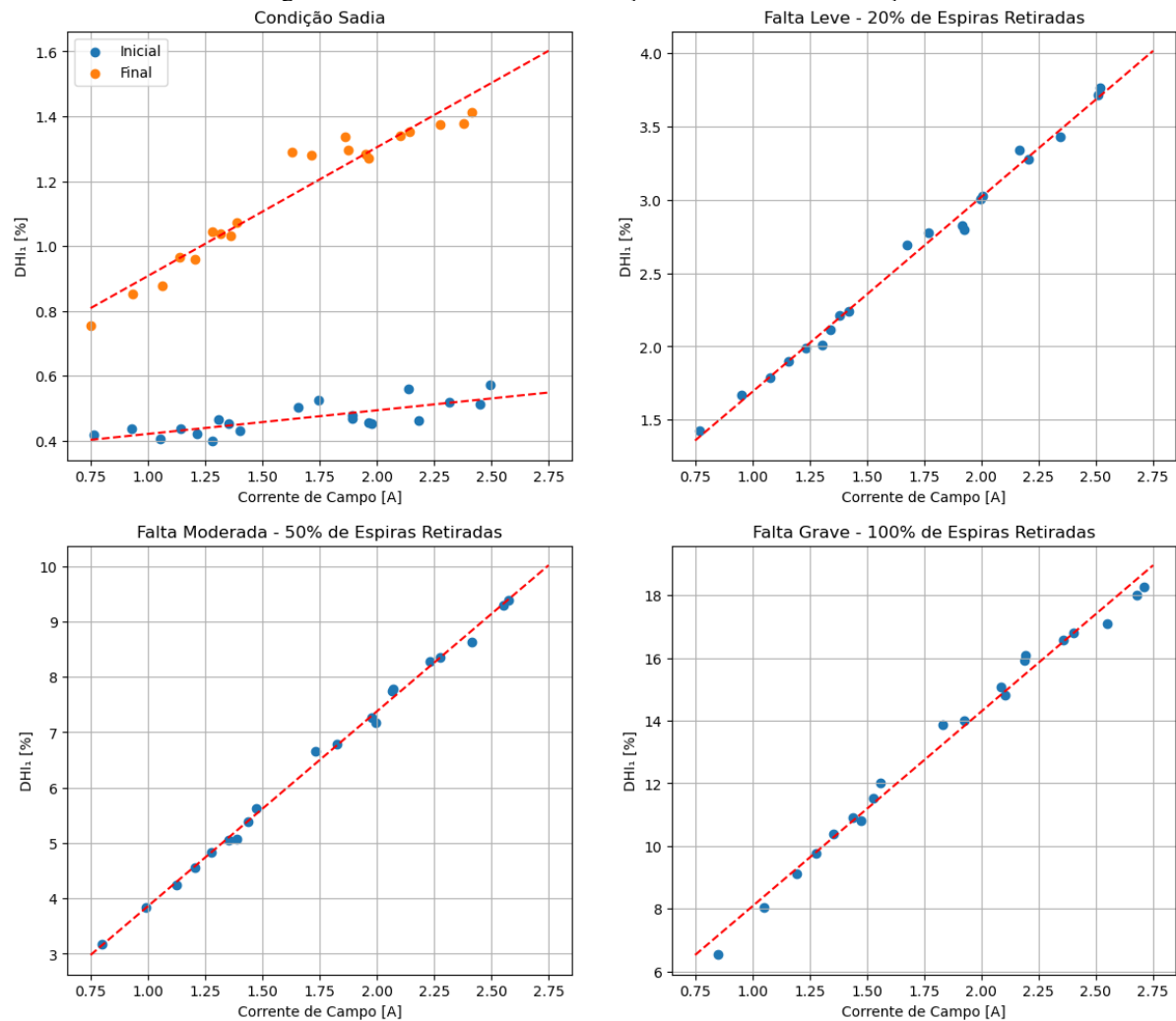


Fonte: Autor.

A partir do que foi apresentado, é possível concluir que a detecção e mensuração do grau do defeito são possíveis através do nível da DHI_1 . Porém, esse indicador é altamente dependente da corrente de excitação do gerador síncrono. Como os valores da DHI_1 apresentam uma variação pouco significativa dentro de cada condição (isto é, formando patamares bem definidos), calculou-se o valor médio desse indicador em cada condição (sadia pré e pós-falta,

falta leve, falta moderada, falta grave) para 20 POs (um foi mantido para validação) e traçou-se o em função da corrente de excitação. O resultado, bem como a regressão linear destes pontos, é mostrado na Figura 52 (curvas apenas para o sensor 0°), e a Tabela V apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) das regressões lineares. O R^2 varia entre 0 e 1, sendo que valores mais próximos a unidade indicam que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

Figura 52 – Média da DHI_1 em função da corrente de excitação.



Fonte: Autor.

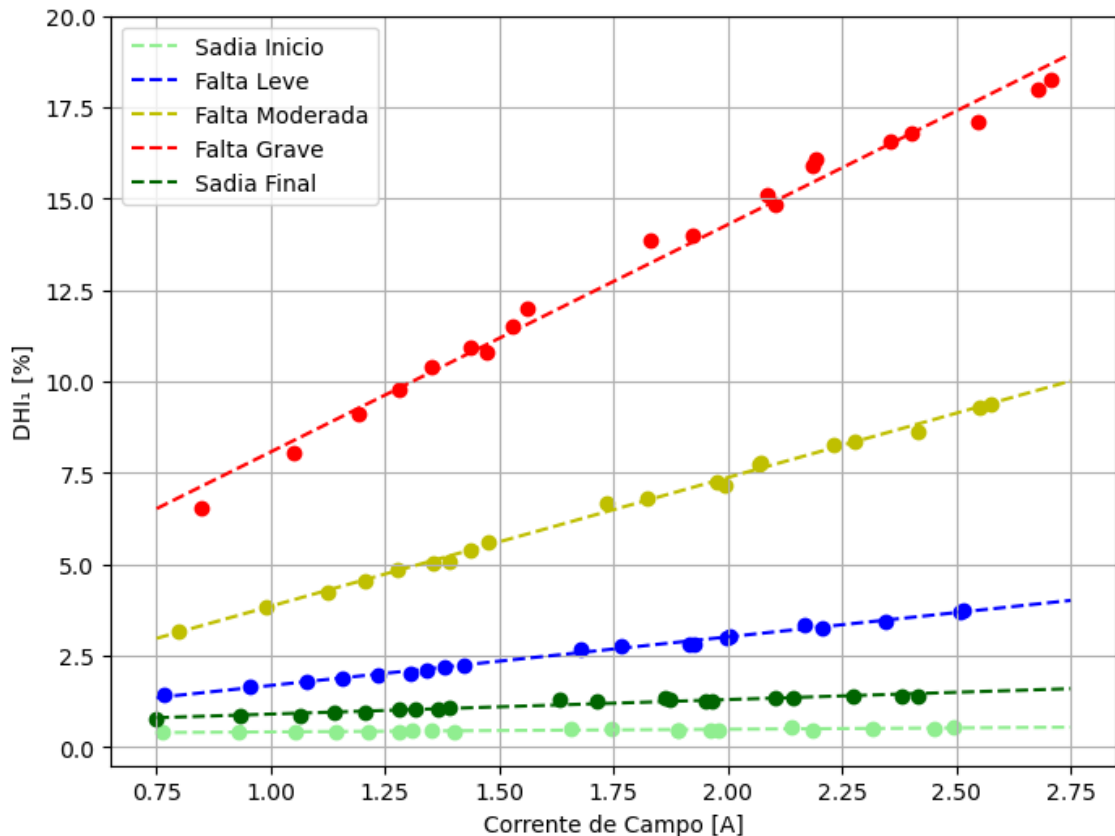
Tabela V – Valores de R^2 das regressões lineares da Figura 52.

Condição	R^2
Sadia Pré Falta	0,60675
Falta Lave	0,99304
Falta Moderada	0,99670
Falta Grave	0,98838
Sadia Pós Falta	0,93206

Fonte: Autor.

O exposto na Figura 52 é extremamente positivo, visto que as regressões lineares para as condições de falta possuem um R^2 elevado, ou seja, mostram que a relação entre a DHI_1 e a corrente de excitação é fortemente linear. Em seguida, a Figura 53 fornece todas as curvas de regressões lineares e pontos experimentais do sensor 0° em um mesmo gráfico.

Figura 53 – Regressões lineares e pontos experimentais.

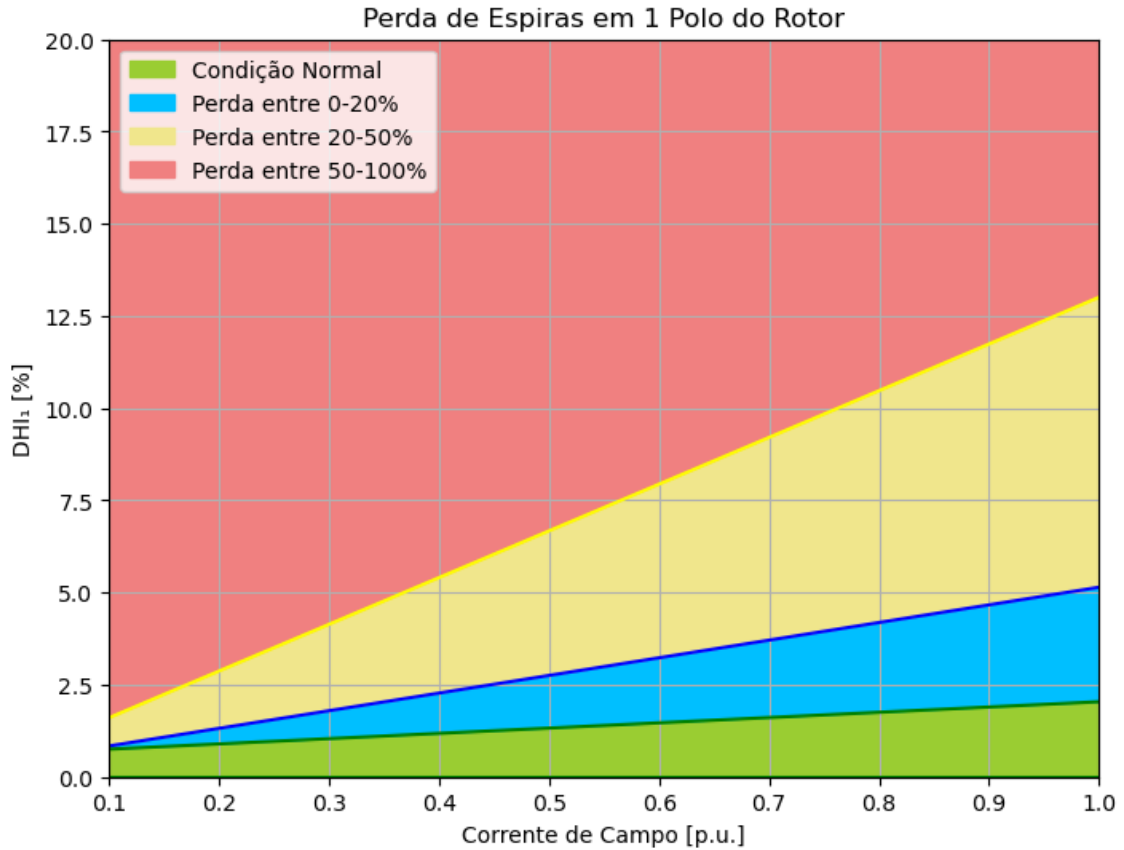


Fonte: Autor.

Com base no comportamento da DHI_1 da Figura 53, é possível criar regiões em que a máquina está sadia e que mensuram a severidade do defeito. O valor de R^2 encontrado para a condição sadia pré-falta é de pouca relevância, pois qualquer ponto abaixo da curva sadia pós-falta (Sadia Final) garante que o gerador esteja operando na normalidade ou com um grau baixíssimo de perda de espiras no enrolamento de excitação. Valores de DHI_1 acima da reta “Falta Grave” indicam uma perda elevadíssima de espiras em um polo do rotor do gerador. Enfim, a Figura 54 mostra um diagrama para detecção e avaliação do nível do defeito. Para assegurar um menor número de falsos-positivos, o coeficiente linear da reta “Sadia Final” (Figura 53) é aumentado de, aproximadamente, 10% para que 95% dos pontos estejam abaixo

desta nova reta. A corrente de excitação foi normalizada pelo seu valor nominal (sistema por unidade).

Figura 54 – Diagrama para avaliação do defeito de perda de espiras no rotor.



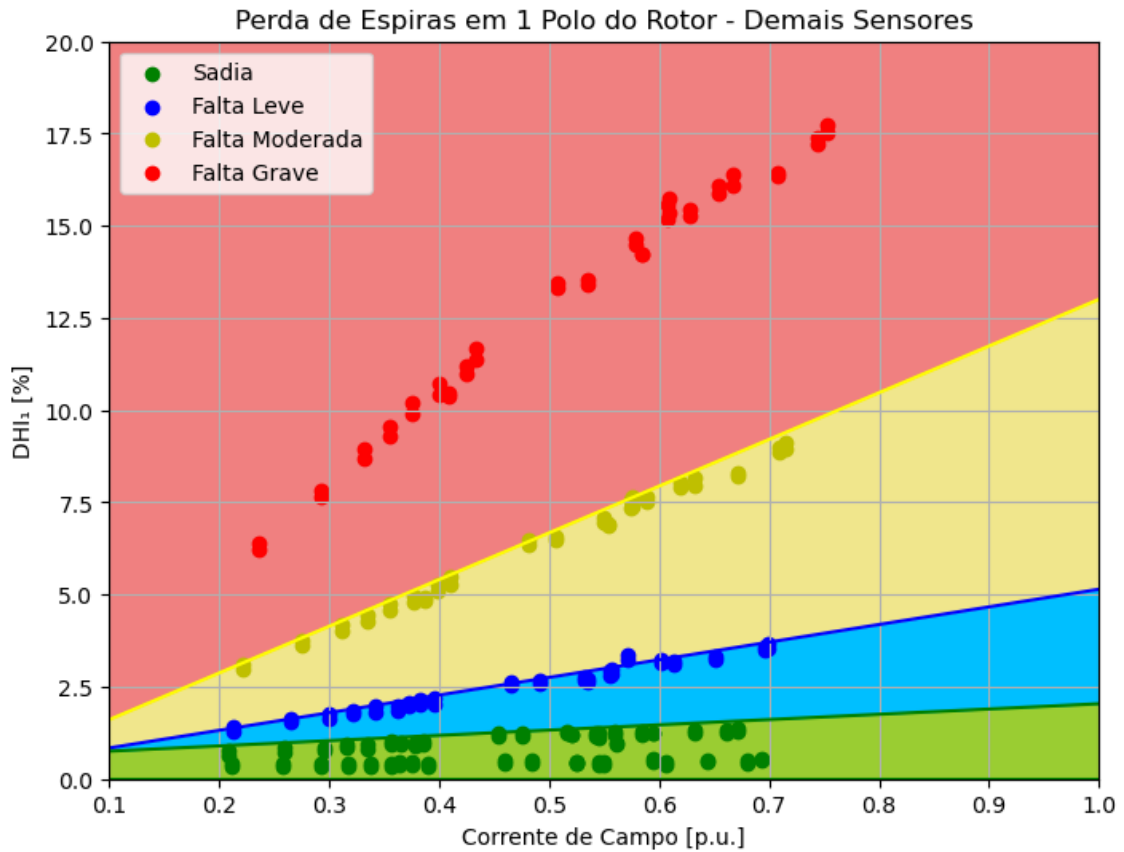
Fonte: Autor.

O diagrama acima exposto permite que, ao monitorar os valores da DHI_1 e da corrente de excitação, o usuário saiba, em tempo real, a existência e a evolução deste defeito. Para uma corrente de excitação fixa, à medida que o ponto se desloca verticalmente para cima, tem-se o agravamento da falta, ou seja, um aumento da perda de espiras no enrolamento de excitação. Este resultado permite detectar e mensurar o grau do defeito em qualquer ponto de operação dentro da curva de capacidade do gerador. Ainda, seria conveniente, e até mesmo necessário, realizar ensaios em diferentes geradores de diversas potências para verificar se o diagrama proposto não é um caso particular desta máquina. Em caso positivo, a técnica proposta não necessitaria de armazenamento de dados, algo de grande relevância para o monitoramento de condição de máquina.

Mencionou-se que o diagrama exposto na Figura 54 foi construído apenas a partir dos dados do sensor 0° , pois o comportamento é muito similar em todos os transdutores. Mas, para corroborar com esta afirmação, a Figura 55 fornece o diagrama anterior com o acréscimo dos

pontos provindos dos demais sensores nas diferentes condições do defeito. Nota-se que o resultado é o esperado e muito positivo sob o aspecto da estratégia para a detecção deste defeito.

Figura 55 – Avaliação dos pontos acrescentando os dos demais sensores.



Fonte: Autor.

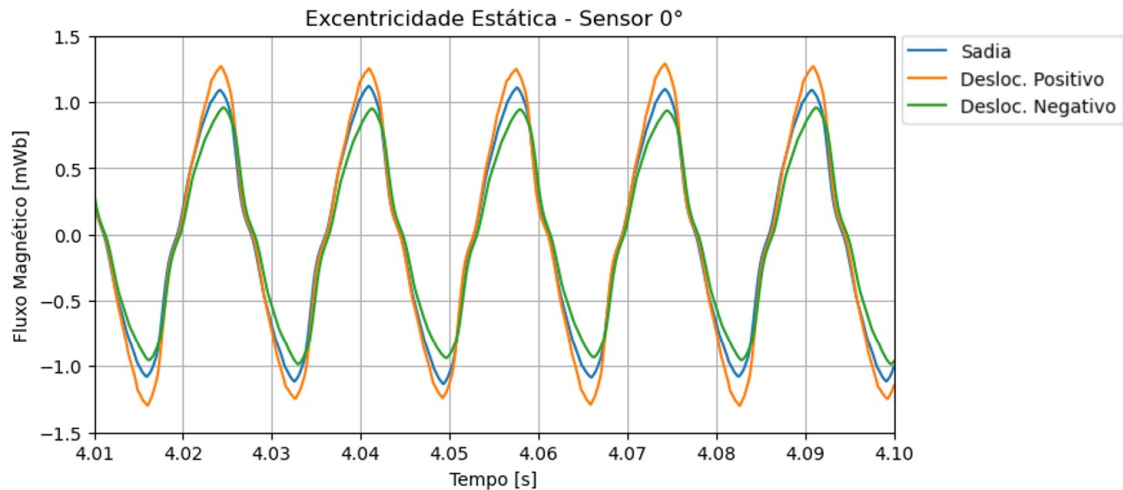
O resultado acima corrobora que para essa falta todos os sensores devem apresentar uma DHI₁ muito semelhante, pois o defeito é girante com o rotor. Logo, com a instalação de mais de um sensor de fluxo magnético de entreferro, os valores de DHI₁ dos sinais dos transdutores devem ser muito próximos (convergiem) dentro do diagrama de detecção da Figura 54. Caso isso não ocorra, há indícios da presença de uma falta de outra natureza, ou que existe um mau funcionamento em um ou mais sensores.

5.3 DETECÇÃO DE EXCENTRICIDADE ESTÁTICA

Para o caso de excentricidade estática, assim como no caso anterior, será tratado o contexto da falta para um ponto de operação fixo, e em seguida para os demais carregamentos. Lembra-se que a convenção utilizada neste trabalho é que deslocamentos positivos do eixo do rotor correspondem a uma elevação da posição de equilíbrio, deslocamentos negativos a um

rebaixamento e o ponto de alinhamento é o valor nulo. A Figura 56 fornece a forma de onda do fluxo magnético do sensor 0° para a máquina sadia (eixo alinhado), com um deslocamento positivo de 0,5 mm (25% do entreferro) nos dois lados e com um deslocamento negativo de -0,5 mm (25% do entreferro) em ambos os lados para o PO de 4,5 kVA e fator de potência unitário.

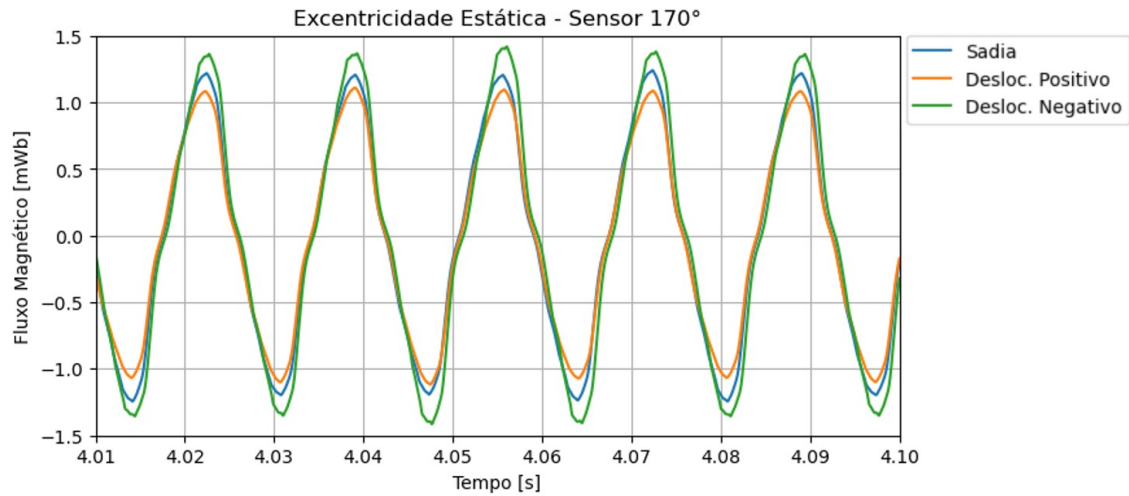
Figura 56 – Fluxo no sensor 0° com e sem excentricidade, PO fixo.



Fonte: Autor.

Observa-se que o fluxo medido pelo sensor 0° aumenta conforme o deslocamento do eixo se torna positivo. Quando o rotor se move para cima, o entreferro se torna menor na região superior da máquina. Em contrapartida, espera-se que o comportamento seja oposto para o sensor de 170° , visto que em sua vizinhança o tamanho do entreferro aumenta à medida que o eixo é movido para cima. Para confirmar essa hipótese, a Figura 57 fornece as mesmas formas de onda no mesmo ponto de operação para o sensor de 170° .

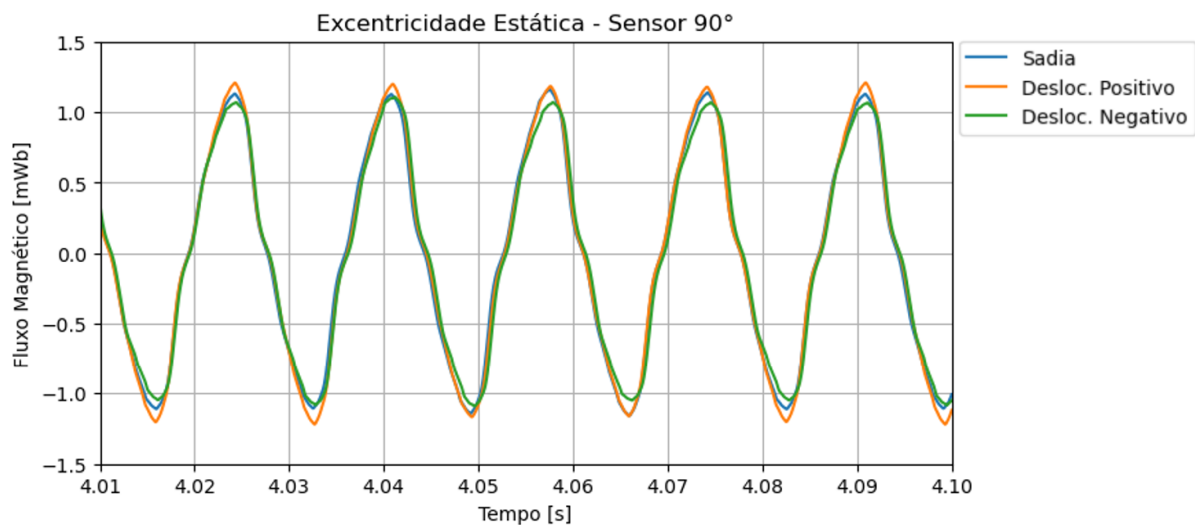
Figura 57 – Fluxo no sensor 170° com e sem excentricidade, PO fixo.



Fonte: Autor.

Comentou-se no capítulo 3 que a estratégia de detecção para este defeito consiste da análise da diferença dos fluxos de sensores defasados de 180° na circunferência interna do estator do gerador. Por essa razão, omitem-se as formas de onda do sensor 25°, pois este transdutor oferece menos informação que o sensor 0°. Teoricamente, o sensor a 90° não deveria apresentar alterações significativas para as excentricidades impostas neste trabalho, pois todas elas ocorrem exclusivamente no eixo vertical, ou seja, ortogonais ao sensor 90°. Para confirmar isso, a Figura 58 mostra as mesmas formas de onda da Figura 56 e Figura 57, porém para o sensor 90°.

Figura 58 – Fluxo no sensor 90° com e sem excentricidade, PO fixo.

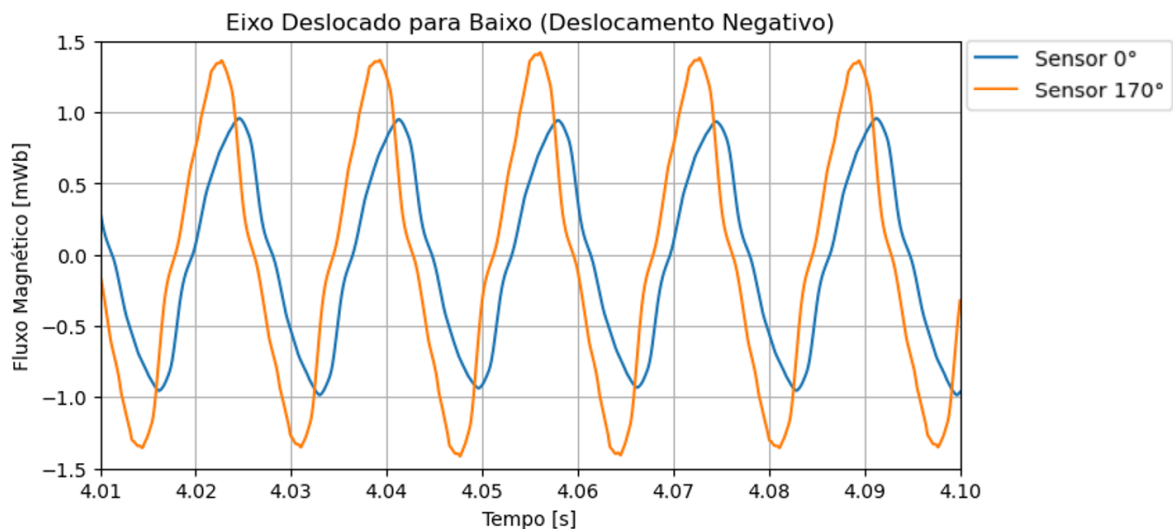


Fonte: Autor.

Conforme o comportamento das formas de onda apresentados na Figura 58, confirma-se a teoria discutida com este resultado, sendo que a pouca diferença notada visualmente pode ser provinda dos seguintes fatores: o sensor não é perfeitamente ortogonal ao eixo de deslocamento (vide Figura 37 e Figura 41), a possibilidade do mancal deslizante inserir um baixíssimo deslocamento horizontal do eixo e de possíveis ligeiras distribuições de fluxos provindos de anisotropias magnéticas ou de diferenças construtivas.

O último passo na análise no domínio do tempo com carregamento fixo é comparar as formas de onda do fluxo magnético dos sensores 0° e 170° sob excentricidade estática, para verificar se a diferença entre essas formas de onda é realmente significativa. A Figura 59 mostra então as formas de onda dos dois sensores para uma excentricidade negativa de 25% do tamanho do entreferro. O resultado é uma diferença de aproximadamente 25% na amplitude ou no valor eficaz entre as duas formas de onda e corrobora com comportamento das formas de onda idealizadas apresentadas na Figura 29.

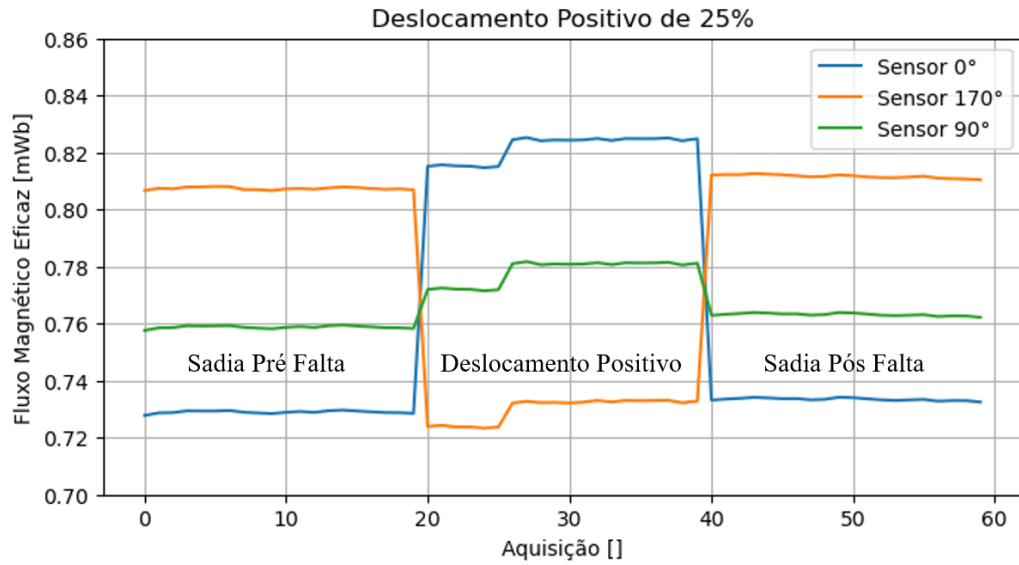
Figura 59 – Fluxo nos sensores com excentricidade, PO fixo.



Fonte: Autor.

Uma estratégia de detecção simples para esta falta é comparar diretamente o valor eficaz dos fluxos medidos pelos dois sensores. A Figura 60 mostra o valor eficaz dos fluxos nos sensores 0° , 90° e 170° ao longo das aquisições quando o gerador síncrono está sadio, depois com deslocamento positivo de 25% e novamente sadio.

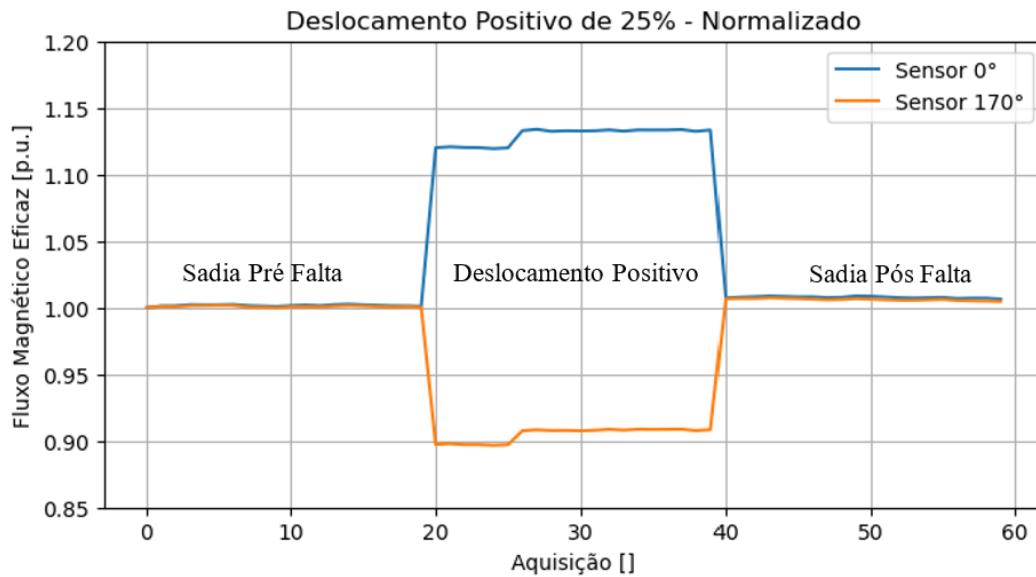
Figura 60 – Histórico do valor eficaz do fluxo medido pelos sensores, PO fixo.



Fonte: Autor.

Observa-se que o fluxo eficaz medido pelo sensor 0° quando a máquina está sadia é aproximadamente igual ao do sensor 170° com o defeito de excentricidade estática. Esse resultado gera no mínimo estranheza, pois afinal por quê os valores sádios de fluxo de ambos os sensores são tão diferentes? Uma resposta para essa pergunta seria que o transdutor na posição 0° encontra-se no topo do dente, ao passo que o de 170° está no fundo do dente. Isso é reforçado pelo valor do fluxo no estado sadio do sensor 90° ser, aproximadamente, 4% maior que o de 0° , e o de 170° cerca de 10% maior. Uma solução para esse problema seria normalizar os valores de fluxo por seus respectivos valores sádios. Os resultados dessa operação são apresentados na Figura 61.

Figura 61 – Histórico do valor eficaz dos fluxos normalizados, PO fixo.

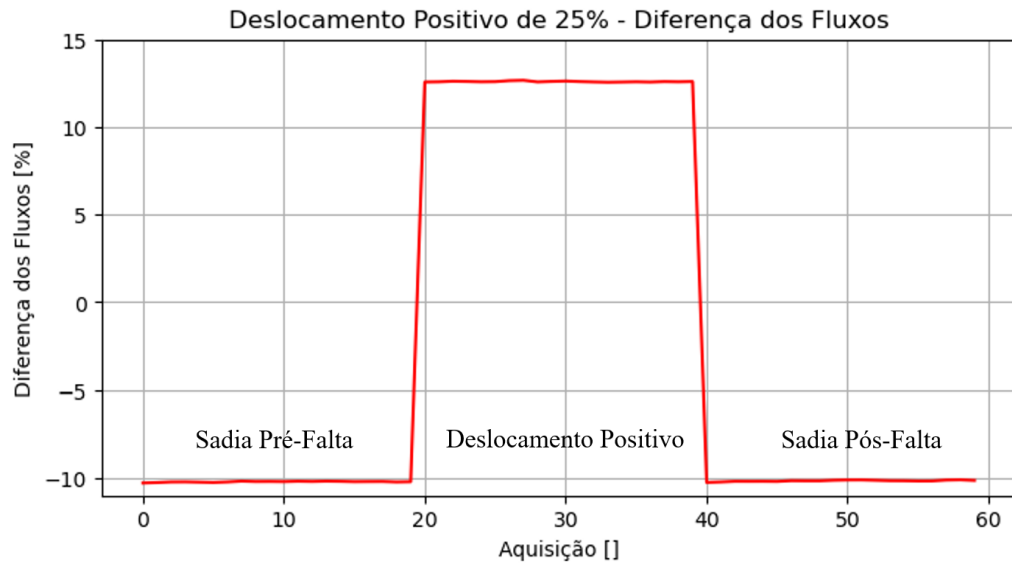


Fonte: Autor.

A proposta aparentemente resolve o problema, e seria possível até detectar a falta apenas com um dos sensores. Entretanto, essa técnica apresenta um empecilho. O sistema de detecção necessitaria saber previamente o valor sadio do fluxo. Além disso, não é possível determinar o quanto esse valor varia à medida que o carregamento do gerador se altera.

Uma solução alternativa para solucionar o problema é calcular a diferença dos fluxos medidos por sensores defasados de 180° na circunferência interna do estator referenciados ao valor médio do fluxo nesse eixo, conforme (3.2). Um resultado da aplicação desta proposta pode ser visualizado no comportamento da curva da Figura 62, utilizando as medidas dos sensores a 0° e a 170° . Observa-se que existe uma diferença de -10% já na condição sadia do GS, a qual é evidenciada pelo resultado apresentado na Figura 60, onde os valores iniciais (até 20 aquisições) de cada curva deveriam ser semelhantes. Além dos sensores não estarem exatamente defasados de 180° , uma parcela desta diferença pode provir da posição dos sensores em cada dente. Como não é possível realocar os sensores, uma opção seria utilizar as medidas do sensor 90° em referência ao de 0° , que possuem uma diferença de -4%. Entretanto, a utilização destes sensores com essa estratégia não seria capaz de detectar um deslocamento do eixo na bissetriz (45°), pois a variação seria aproximadamente igual para ambos os transdutores.

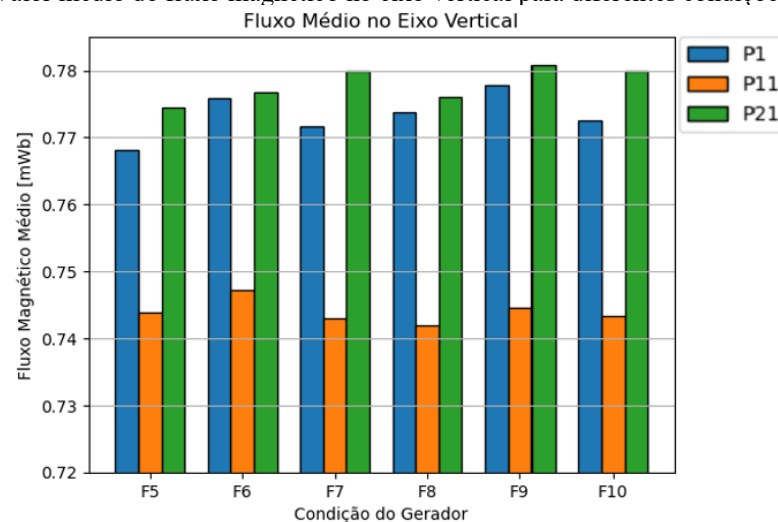
Figura 62 – Histórico da diferença dos fluxos, PO fixo.



Fonte: Autor.

A normalização utilizando o valor eficaz do fluxo médio foi escolhida com a expectativa que esse valor sofresse pouca alteração com a imposição do defeito. A Figura 63 apresenta um gráfico de barras comparando o valor eficaz do fluxo médio magnético no eixo vertical do gerador para seis condições (F5 a F10, descritas na Tabela IV) e três pontos de operação (vide Tabela III). Observa-se que para um ponto de operação fixo, a variação do valor eficaz do fluxo médio com a alteração da condição da máquina é baixa (menor que 1,5% em todos os casos mostrados na Figura 63). Além disso, como esperado, o valor eficaz do fluxo médio modifica-se significativamente quando o ponto de operação é alterado.

Figura 63 – Valor médio do fluxo magnético no eixo vertical para diferentes condições de operação.



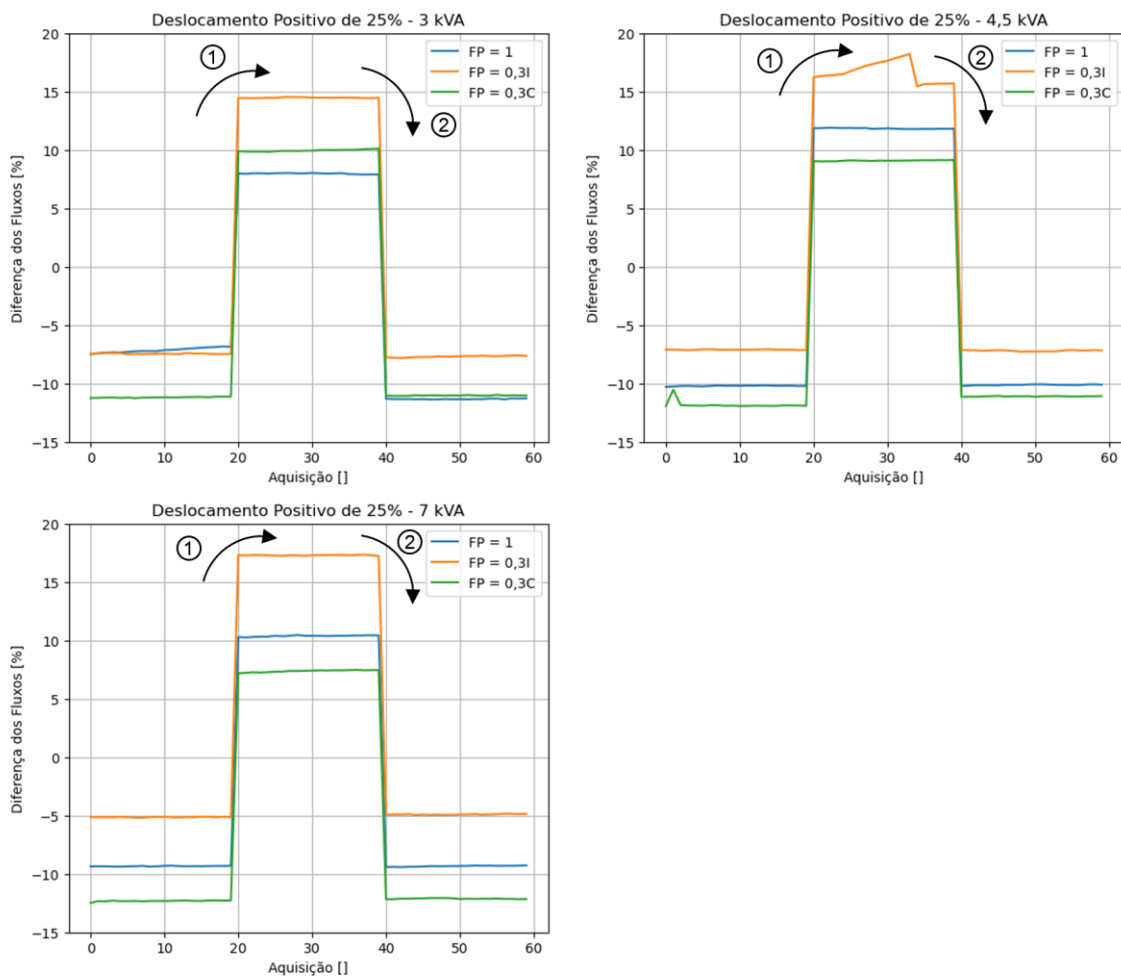
Fonte: Autor.

É necessário analisar se a estratégia proposta é imune à variação do PO e se permite mensurar o grau de severidade da falta, de maneira a possibilitar a construção de um diagrama com função similar ao do defeito de perdas de espiras em um polo do rotor.

A Figura 64 fornece os valores da diferença dos fluxos para diferentes fatores de potência em cada curva, mantendo a potência aparente constante no resultado apresentado em cada gráfico. Nos gráficos, ① é a transição da condição sadia pré-falta para deslocamento positivo de 25% e ② é a transição da condição de deslocamento positivo de 25% para sadia pós-falta. Observe que o número de aquisições por ensaio é levemente diferente.

As curvas da Figura 64 mostram que os valores da diferença dos fluxos na condição de deslocamento positivo (intervalo de aquisições entre 20 e 40), são maiores quando o fator de potência da máquina é indutivo (curvas FP = 0,3I, na Figura 64), para as três potências aparentes, quando comparada aos demais fatores de potência. Esse resultado indica que existe uma correlação direta da corrente de excitação com a diferença dos fluxos.

Figura 64 – Diferença dos fluxos com inserção de deslocamento positivo, potência aparente fixa.

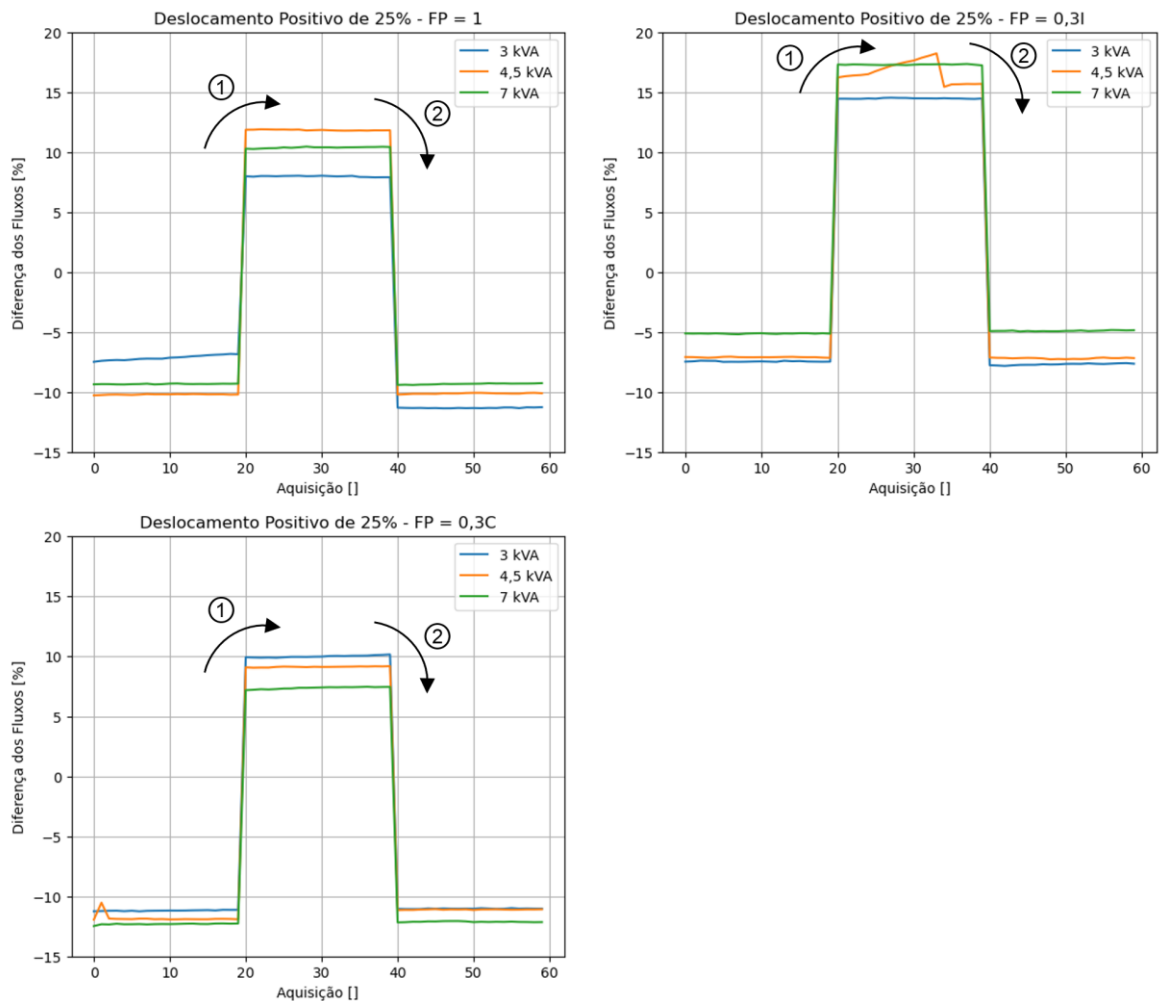


Fonte: Autor.

A Figura 65 mostra as mesmas curvas da Figura 64, mas com cada gráfico apresentando o resultado com fator de potência constante e cada curva alterando a potência aparente. Nos gráficos, ① é a transição da condição sadia pré-falta para deslocamento positivo de 25% e ② é a transição da condição de deslocamento positivo de 25% para sadia pós-falta. Observe que o número de aquisições por ensaio é levemente diferente.

Os gráficos apresentados na Figura 65 mostram que em cada condição da máquina existe variação dos valores da diferença dos fluxos quando a potência aparente é alterada, mantendo o fator de potência constante. Contudo, a amplitude de variação é relativamente menor quando comparada aos resultados de perda de espiras em um polo do rotor. O comportamento das curvas da Figura 64 e da Figura 65 indicam que a corrente de excitação é uma grandeza que pode auxiliar na detecção e mensuração da excentricidade estática, independentemente da variação do ponto de operação do gerador

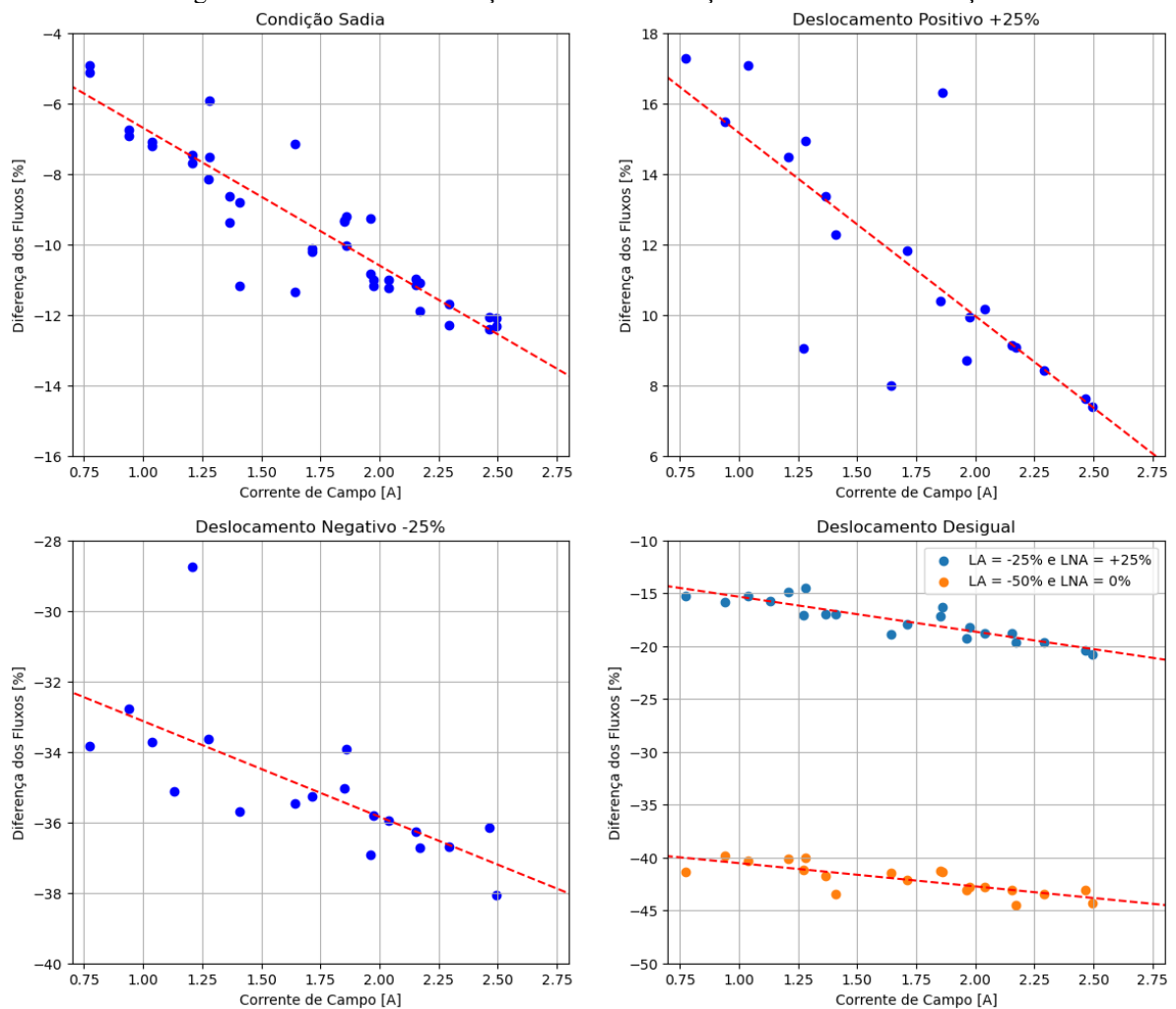
Figura 65 – Diferença do fluxo, deslocamento positivo, fator de potência fixo.



Fonte: Autor.

A Figura 66 apresenta as médias das diferenças dos fluxos em função da corrente de excitação para cada condição (por exemplo, na Figura 65, para o patamar da curva de 3 kVA e $FP = 0,3C$, no intervalo de aquisições entre 20 e 40), junto das suas respectivas regressões lineares. Lembra-se que além dos ensaios com deslocamentos positivos e negativos de ambos os lados da máquina, foram realizados experimentos com o eixo em uma posição diagonal, isto é, deslocamentos desiguais em cada lado do mancal. Esses deslocamentos desiguais (ou diagonal) se referem a uma inserção distinta no mancal do lado acoplado à máquina primária (LA) e do lado não acoplado (LNA). Esse tipo de excentricidade foi aplicado para verificar se a estratégia seria capaz de detectá-lo, pois como os sensores contemplam todo o pacote estatórico, a aplicação de dois deslocamentos iguais em módulos com sinais opostos poderia resultar um valor nulo na média (isto é, um lado compensar o outro).

Figura 66 – Média da diferença dos fluxos em função da corrente de excitação.



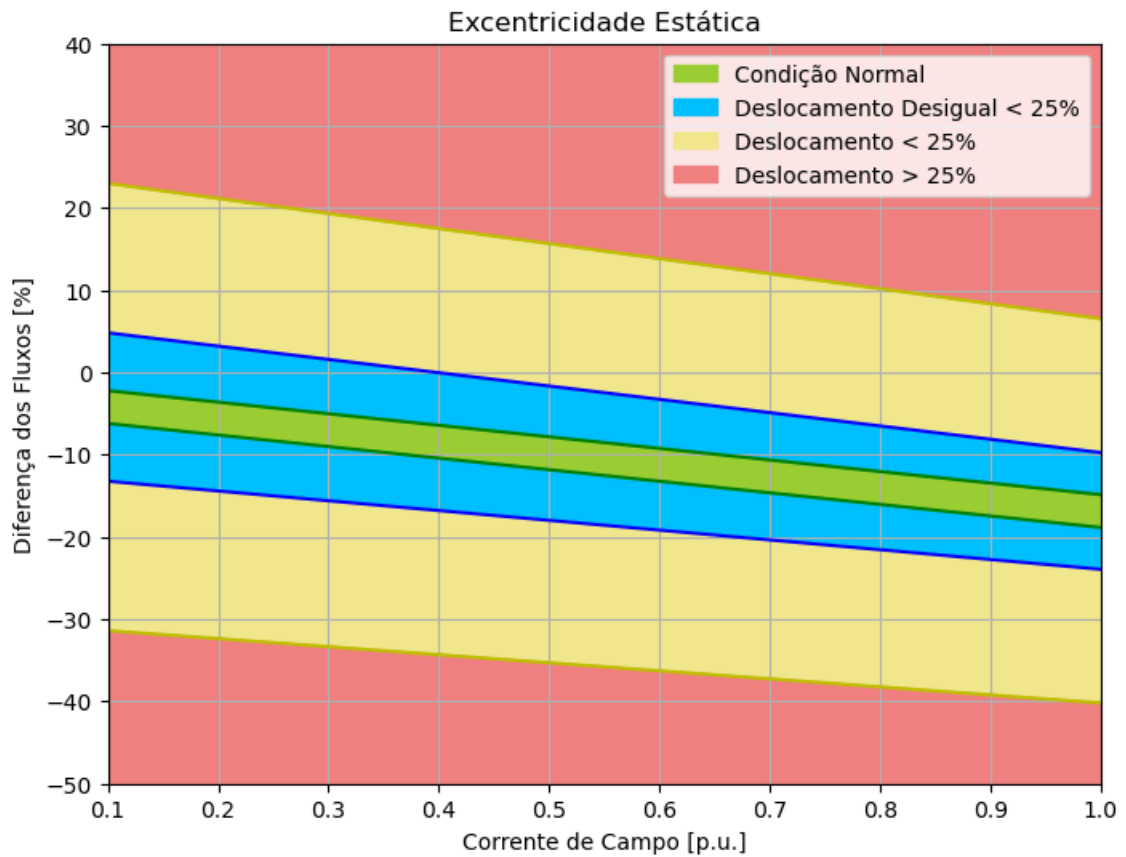
Fonte: Autor.

Pelo comportamento apresentado nas curvas da Figura 66, pode-se concluir que o aumento da corrente de campo gera uma redução da diferença dos fluxos. Além disso, apesar de apresentar uma característica linear, os pontos apresentam uma maior dispersão que os mostrados no resultado da Figura 52 para a perda de espiras em um polo do rotor. Novamente, chama-se a atenção de que os sensores não estão em posições perfeitamente opostas e que o sensor a 170° está no fundo do dente, e não no topo.

A construção do diagrama de detecção deste defeito, mostrado na Figura 67, foi realizado da seguinte forma: duas retas foram traçadas a partir da regressão linear da condição sadia, em que uma delas teve seu coeficiente linear reduzido de cerca de 10% e a outra aumentada em 10% (em referência a regressão linear sadia) para que 95% dos pontos estivessem entre essas duas retas, assim definindo a região de “Condição Normal”. A regressão linear da condição de deslocamento desigual com LA em 25% e LNA em -25% foi escolhida para delimitar a região inferior de “Deslocamento Desigual < 25%”. A regressão linear do deslocamento negativo de 25% delimita a região de “Deslocamento < 25%”, e após essa linha tem-se a região de “Deslocamento > 25%”. O lado superior do diagrama (lado de “cima” da Condição Normal) foi construído espelhando a parcela inferior em relação a “Condição Normal”.

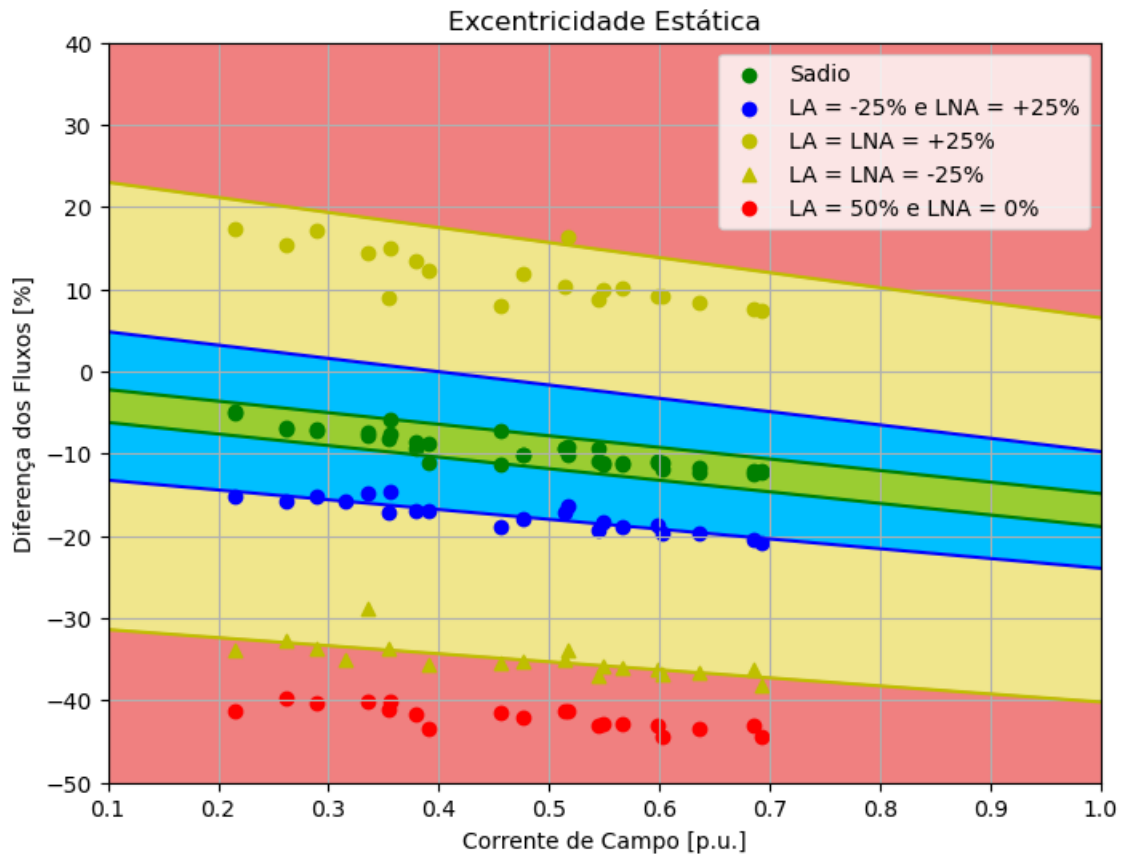
O diagrama apresentado permite detectar e mensurar a gravidade do defeito, além de indicar a direção de movimentação do eixo. No diagrama proposto, apresentado na Figura 67, excentricidades de magnitudes pequenas podem ser confundidas com deslocamentos desiguais com amplitudes opostas nos dois lados de até 25%. Uma forma de resolver esse problema seria a instalação de sensores que não compreendessem todo o pacote estatórico, mas sim metade dele. O resultado mostrado na Figura 67 foi alcançado para deslocamentos verticais. Para identificar um deslocamento na direção horizontal, teoricamente bastaria usar o mesmo diagrama, porém utilizando dados de sensores nas posições 90° e 270° .

Figura 67 – Diagrama para avaliação do defeito de excentricidade estática.



A Figura 68 apresenta o diagrama de avaliação do defeito de excentricidade estática com a adição dos pontos experimentais utilizados para a sua construção. Como mencionado anteriormente, os pontos apresentam uma dispersão maior no entorno das retas que delimitam cada região se comparados ao caso do defeito de perda de espiras no polo do rotor (vide Figura 55).

Figura 68 – Diagrama para avaliação do defeito de excentricidade estática com pontos experimentais.

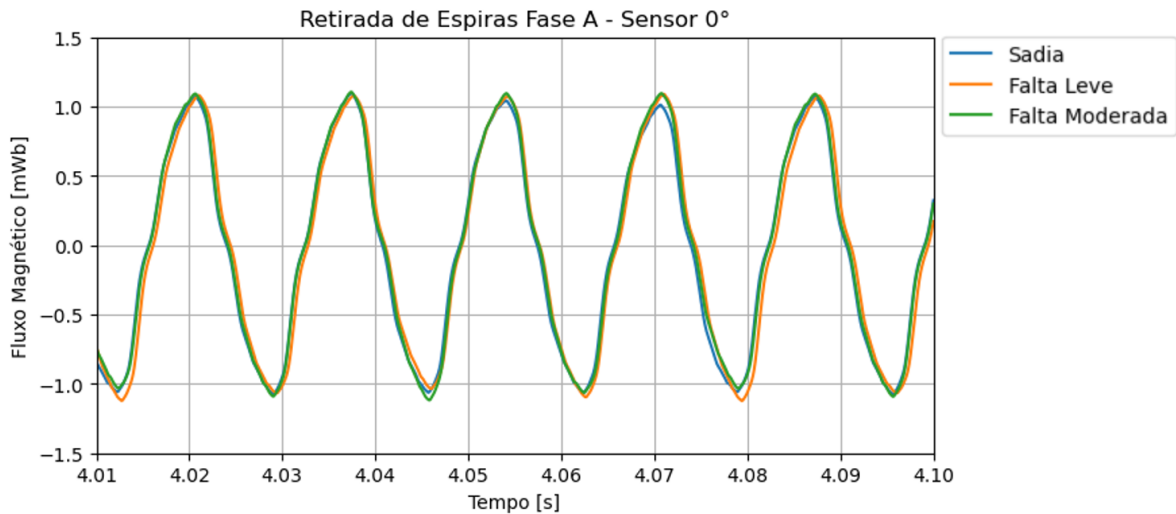


Fonte: Autor.

5.4 DETECÇÃO DE PERDA DE ESPIRAS EM POLO DO ESTATOR

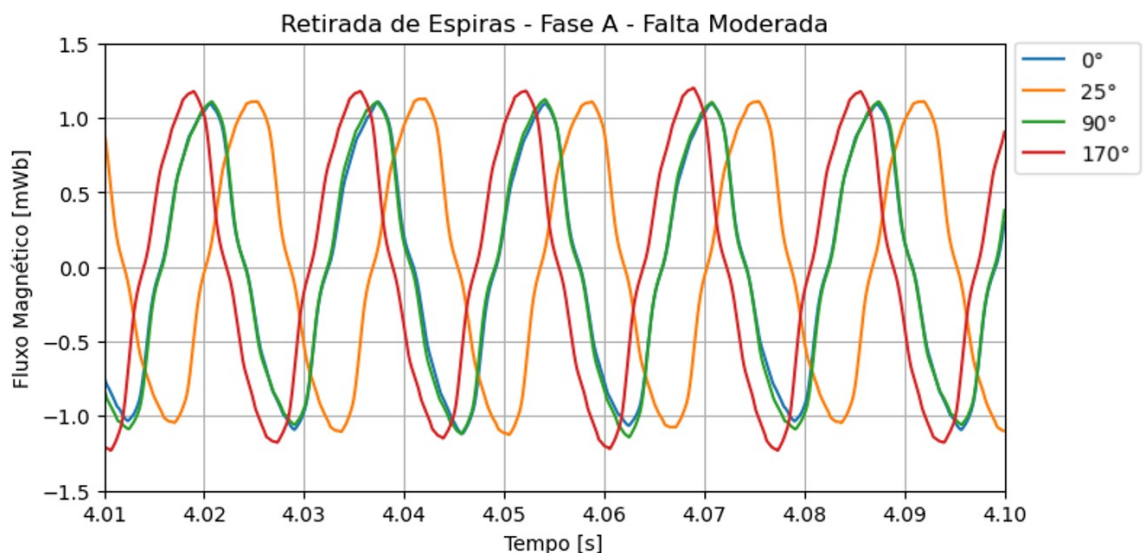
A detecção da última falta explorada neste trabalho é da perda de espiras em polo do estator, a qual corresponde a um dos defeitos com maior ocorrência em motores de indução (vide Figura 17). Como é menos comum a utilização do termo polo do estator, as porcentagens de perda de espiras serão referenciadas ao número total de espiras do enrolamento de armadura. Neste caso, a falta leve corresponde a 2% (3 espiras) de perda do total de espiras do enrolamento, e a falta moderada, 6% (9 espiras). A Figura 69 mostra as formas de onda do fluxo magnético no sensor 0° para as condições sadia, falta leve e falta moderada no ponto de operação de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo (o defeito é imposto na fase A do estator).

Figura 69 – Fluxo no sensor 0° com e sem falta na fase A, PO fixo.



Não é possível notar visualmente diferença significativa entre as formas de onda quando se analisa um único sensor. A Figura 70 mostra as formas de onda do fluxo magnético nos quatro sensores para a condição de falta moderada na fase A com o ponto de operação de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo (o mesmo do caso anterior). Novamente não é possível ver discrepância significativa, mesmo comparando a forma de onda dos quatro sensores.

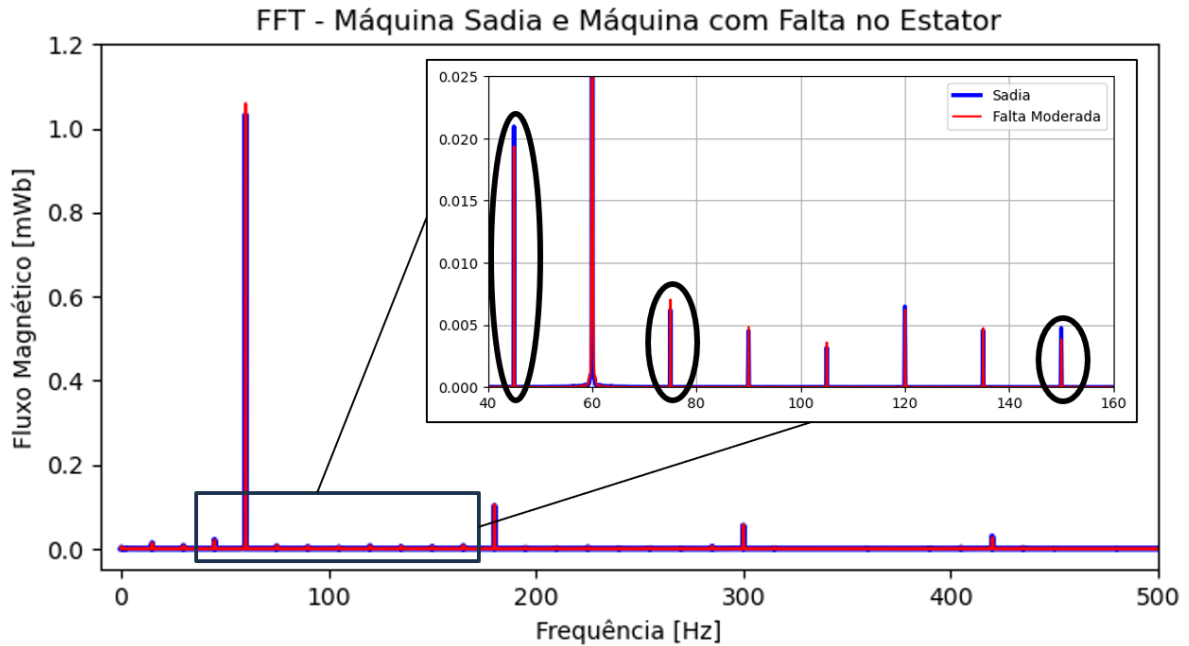
Figura 70 – Fluxo nos sensores com falta moderada na fase A, PO fixo.



Com o objetivo de conseguir alguma informação relevante para o processo de detecção deste defeito, calculou-se a FFT do sinal de fluxo proveniente do sensor 0° para a condição de

máquina sadia e de falta moderada no estator no ponto de operação de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo. O resultado é mostrado na Figura 71, onde as componentes harmônicas que apresentaram maior variação percentual (45, 75 e 150 Hz) foram circeladas. Observa-se que foram alteradas harmônicas abaixo (45 Hz) e acima (75 e 150 Hz) da frequência fundamental elétrica.

Figura 71 – FFT máquina sadia e máquina com falta no estator.

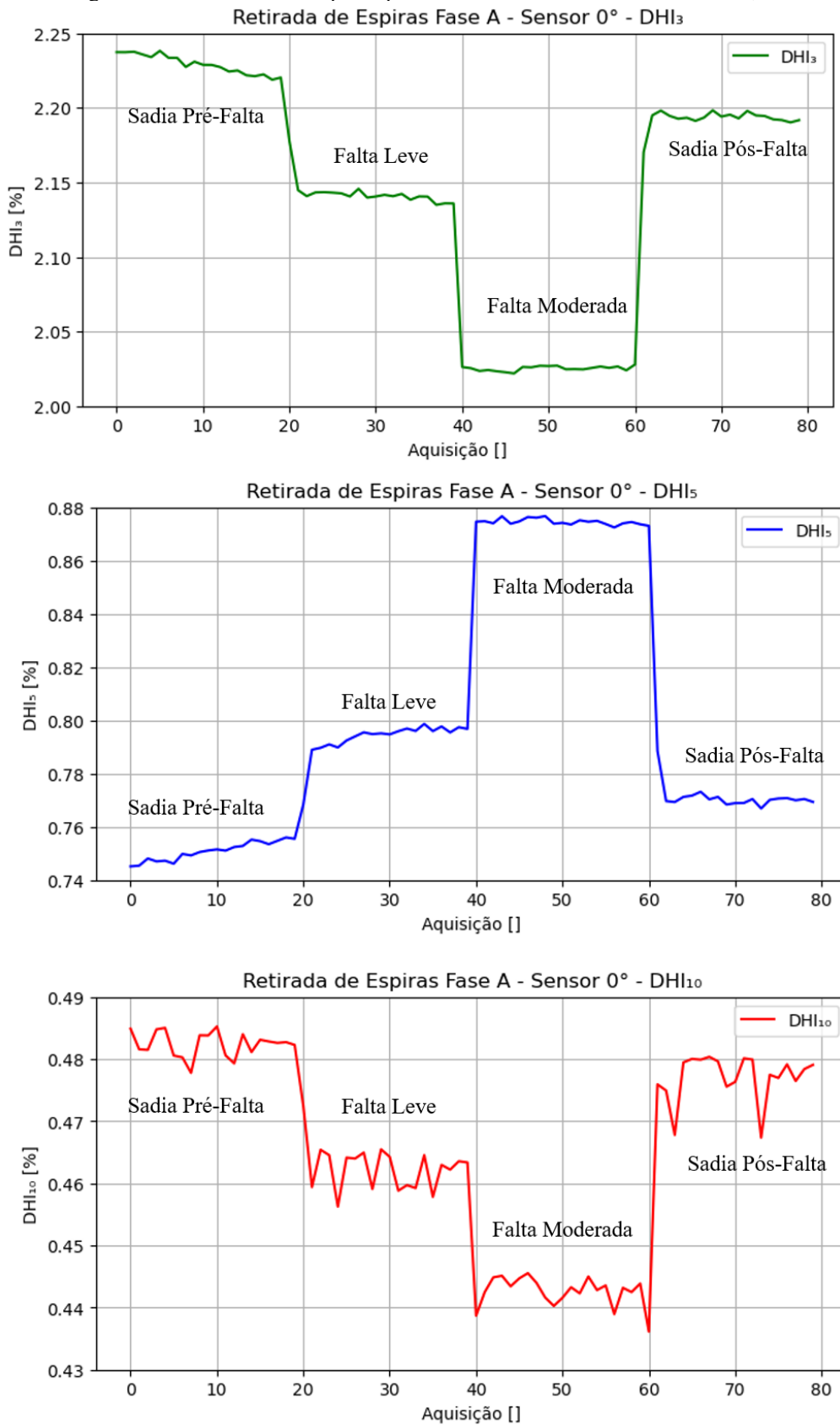


Fonte: Autor.

Calculou-se então as DHIs dessas componentes harmônicas que sofreram maior variação percentual com a imposição da falta, conforme (3.3). A Figura 72 fornece então os valores da DHI_3 , DHI_5 e DHI_{10} ao longo de todo o ensaio de imposição de falta no enrolamento do estator no ponto de operação de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo.

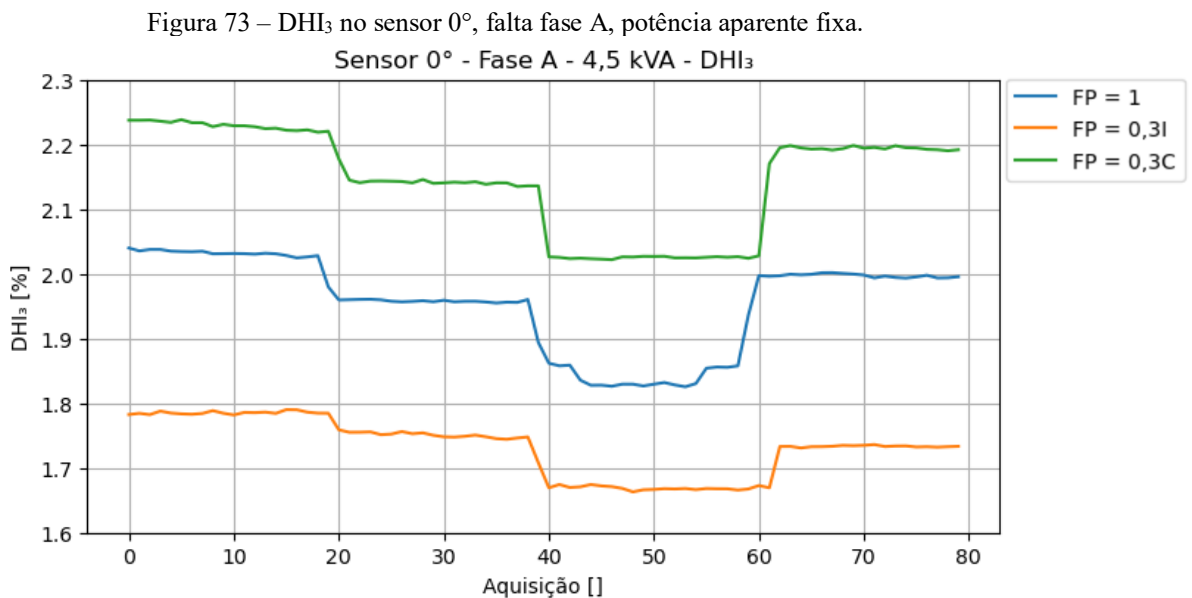
Uma característica que pode ser observada é que a variação dos valores dos indicadores é relativamente baixa com a inserção do defeito. Por exemplo, os valores da DHI_3 apresentam uma diminuição de aproximadamente 20% na condição de falta moderada em relação à condição sadia pré-falta. Em comparação com a detecção de perda de espiras no enrolamento de excitação, os valores da DHI_1 para condição de falta moderada aumentaram em cerca de oito vezes em relação à condição sadia pré-falta para o mesmo ponto de operação. Neste trabalho, será focado o estudo na DHI_3 , pois ela apresentou as maiores magnitude e variação em relação às demais DHIs apresentadas nos gráficos da Figura 72.

Figura 72 – DHIs do sinal captado pelo sensor 0° com e sem falta na fase A, PO fixo.



Fonte: Autor.

Para este tipo de falta, há dois fatores que podem dificultar a detecção pela DHI: a variação do PO e a localização da falta. Como a região de ocorrência do defeito é no estator, local onde os sensores estão posicionados, não é possível prever quais transdutores serão sensibilizados pelo defeito. Primeiramente, será analisado o comportamento da DHI_3 com a variação do carregamento do gerador. A Figura 73 fornece os valores da DHI_3 , ao longo do ensaio de perda de espiras na fase A, para potência aparente de 4,5 kVA e alterando o fator de potência em cada curva.

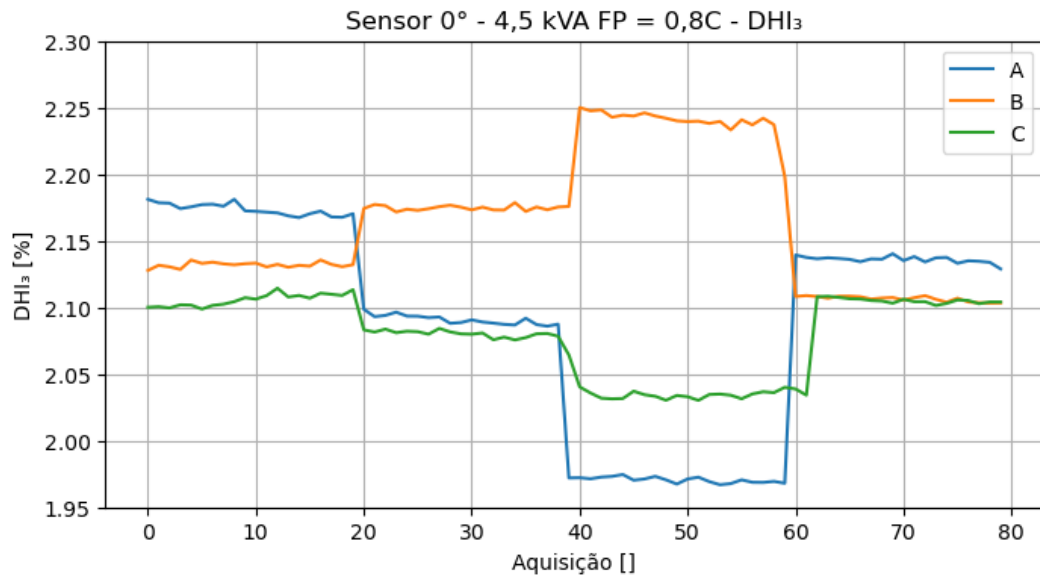


Fonte: Autor.

Observa-se que os maiores valores de DHI_3 são obtidos para a máquina operando com fator de potência capacitivo (curva $FP = 0,3C$, na Figura 73) e os menores com fator de potência indutivo (curva $FP = 0,3I$, na Figura 73). Isso indica que a corrente de excitação pode ser utilizada para segregar uma alteração provocada pela falta de uma causada pela variação do PO.

A Figura 74 apresenta os valores de DHI_3 para o sinal captado pelo sensor 0° , para máquina com potência aparente de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo, alterando a fase do estator que está sob falta. Cada curva é para cada fase com defeito. Note que devido à alteração da localização da falta, há mudanças dos comportamentos da DHI_3 com a inserção do defeito. Por exemplo, no intervalo de 20 a 40 aquisições (inserção de falta leve), a curva da fase B apresenta aumento dos valores do indicador, e as demais curvas (fases A e C) apresentam redução.

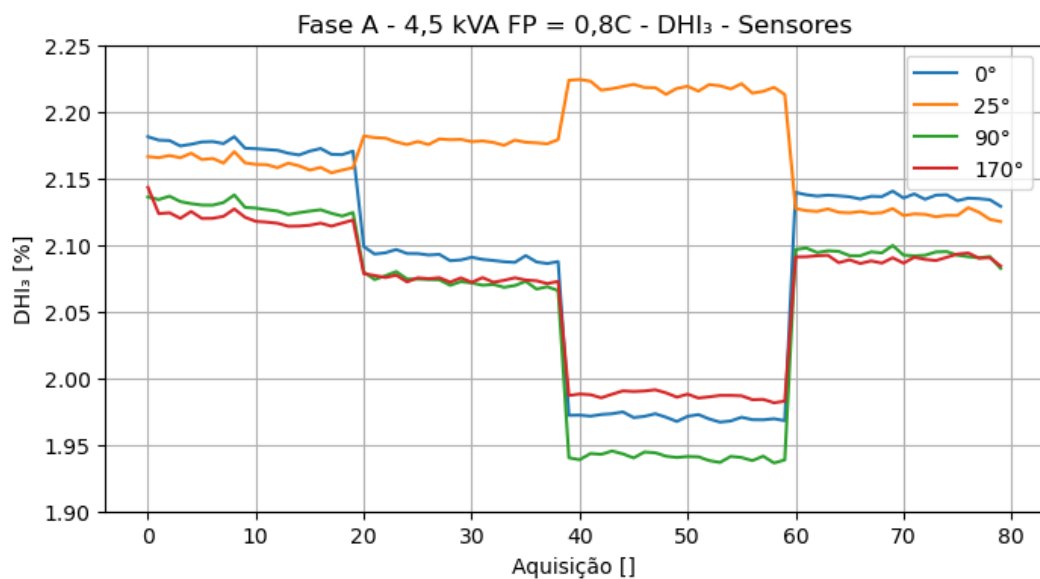
Figura 74 – DHI_3 , sensor 0° , PO fixo, variação da fase sob falta.



Fonte: Autor.

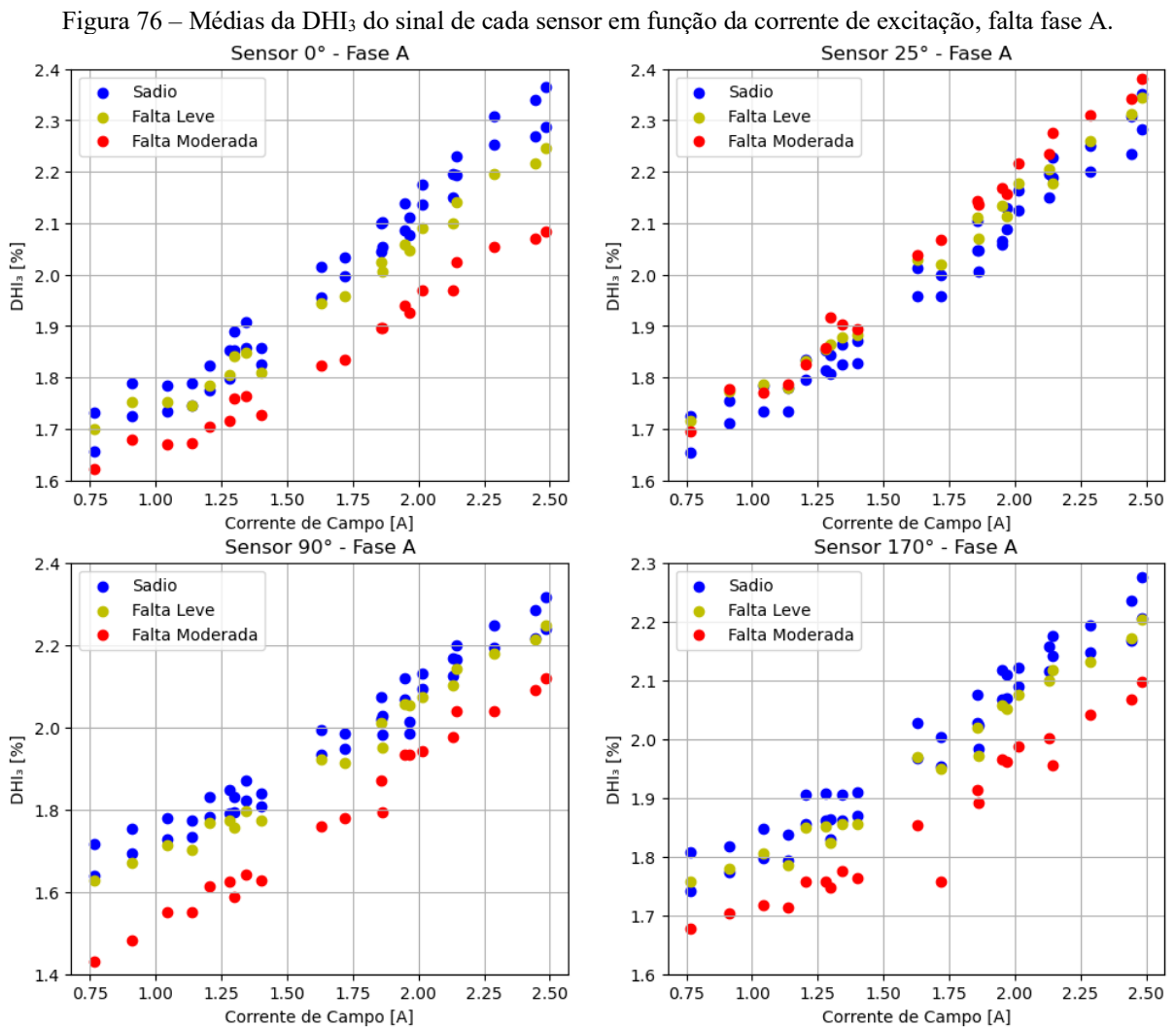
A Figura 75 mostra os valores da DHI_3 dos quatro sensores, ao longo do ensaio com defeito na fase A, com carregamento de 4,5 kVA e fator de potência 0,8 capacitivo. Analisando o intervalo de 20 a 40 aquisições (condição de falta leve), observa-se que o sensor posicionado em 25° apresenta aumento dos valores da DHI_3 , já os demais sensores apresentam redução dos valores do indicador.

Figura 75 – DHI_3 nos quatro sensores, falta fase A, PO fixo.



Fonte: Autor.

Com os resultados apresentados até aqui, aponta-se duas características que podem auxiliar na detecção do defeito. A primeira delas é que os valores da DHI_3 variam significativamente com a alteração da corrente de excitação. A segunda é que os sensores devem, preferencialmente, apresentar respostas distintas com a inserção da falta (devido à característica de localidade do defeito). A Figura 76 mostra, em cada gráfico, as médias da DHI_3 nas três condições da máquina (sadia e falta leve e moderada na fase A) em cada sensor em função da corrente de excitação.

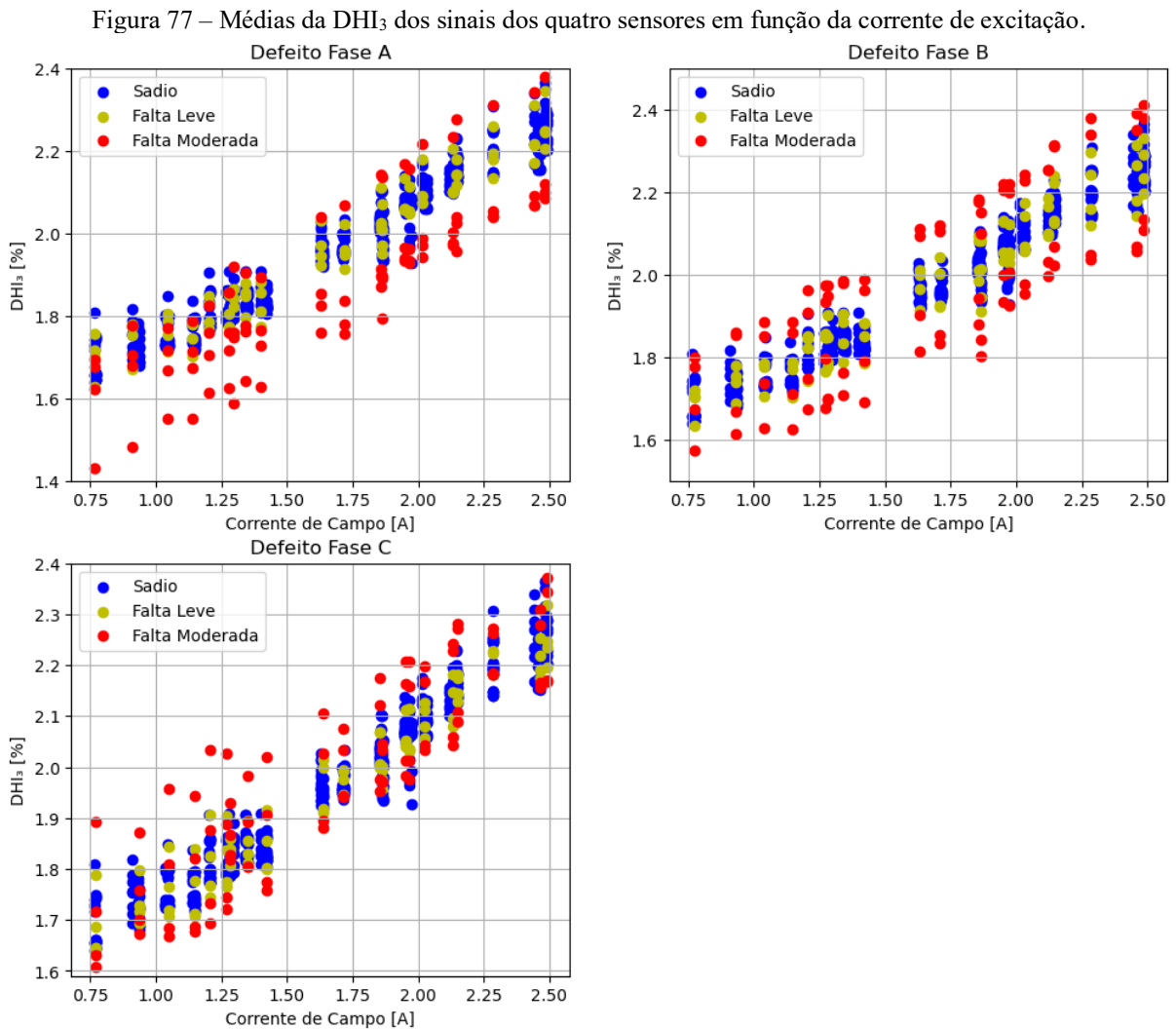


Fonte: Autor.

Observe que em nenhum dos gráficos da Figura 76 é possível traçar uma reta que separe todos os pontos sadios dos de falta leve. Porém, para os gráficos dos sensores 0° , 90° e 170° , há a possibilidade de traçar uma reta que segregue todos os pontos sadios dos de falta

moderada. Isto é, pode-se realizar a detecção da falta na fase A, em seu nível moderado, em todos os POs ensaiados (todas as correntes de excitação ensaiadas).

Para verificar se a detecção do defeito é possível quando se muda a fase que está sob falta, ou seja, quando se altera a localização do defeito, a Figura 77 apresenta, em cada gráfico, as médias da DHI_3 nas três condições da máquina (sadia, falta leve e falta moderada) dos quatro sensores em função da corrente de excitação. Em cada gráfico altera-se a fase que está sob falta.



Fonte: Autor.

Os resultados mostrados nos gráficos da Figura 77 devem ser interpretados levando em consideração que ao menos um sensor precisa detectar o defeito, ou seja, para uma corrente de excitação fixa, deve haver ao menos 1 ponto vermelho (falta moderada) que possa ser segregado dos pontos azuis (sadio) por uma reta. Observe que isso não é possível para o defeito na fase C quando a corrente de campo assume valores entre 2,25 e 2,50 A.

Pelos testes realizados neste trabalho, chegou-se à conclusão que não é possível, utilizando a DHI_3 em função da corrente de excitação, construir um diagrama de detecção para esse tipo de falta.

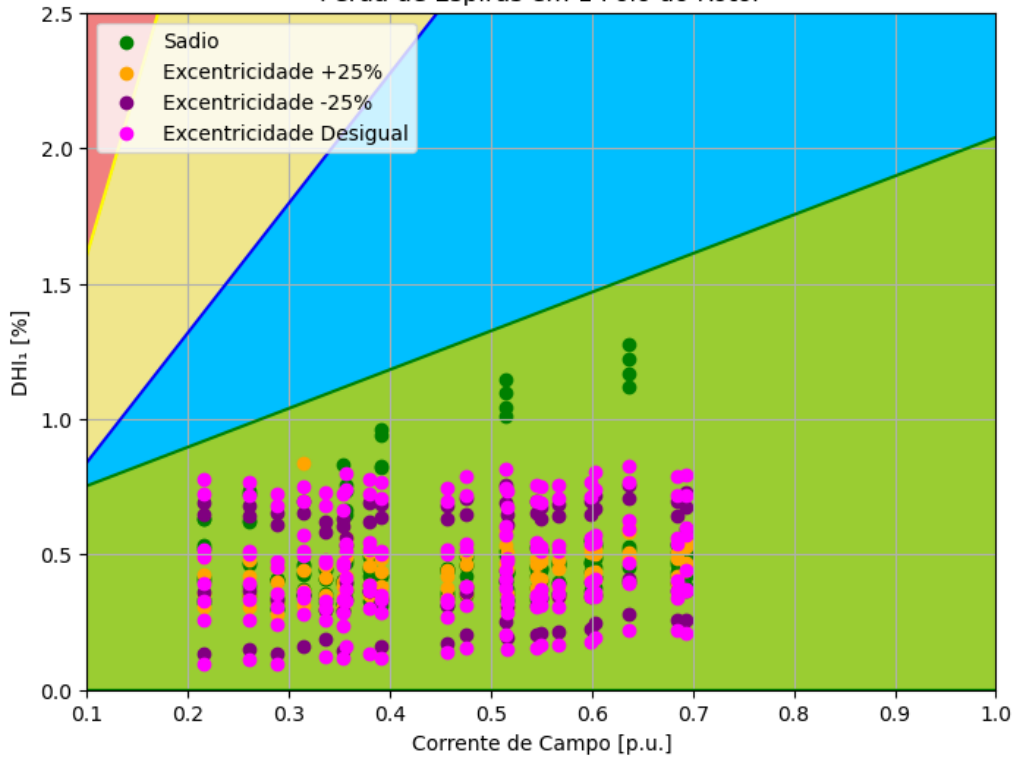
5.5 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS NA DIFERENCIAÇÃO DAS FALTAS

As subseções anteriores tiveram como foco a construção de diagramas que permitissem a detecção e a mensuração de defeitos específicos para qualquer carregamento do gerador. Nesta seção, o objetivo é empregar os dados experimentais de faltas diferentes a esses diagramas. Por exemplo, utilizar os dados de excentricidade estática de +25% na estratégia de detecção de perda de espiras no enrolamento de excitação. Isso é feito para verificar se as estratégias desenvolvidas são capazes de diferenciar uma falta de outra.

A Figura 78 apresenta o diagrama de detecção de perda de espiras em um polo do rotor com o emprego de pontos sádios, com excentricidade estática de +25%, com excentricidade estática de -25% e com excentricidades desiguais nos dois lados do eixo do rotor. Observa-se que a estratégia de detecção utilizada é robusta, pois ela não foi sensibilizada pelo defeito de excentricidade estática, isto é, o método é capaz de diferenciar essas duas faltas.

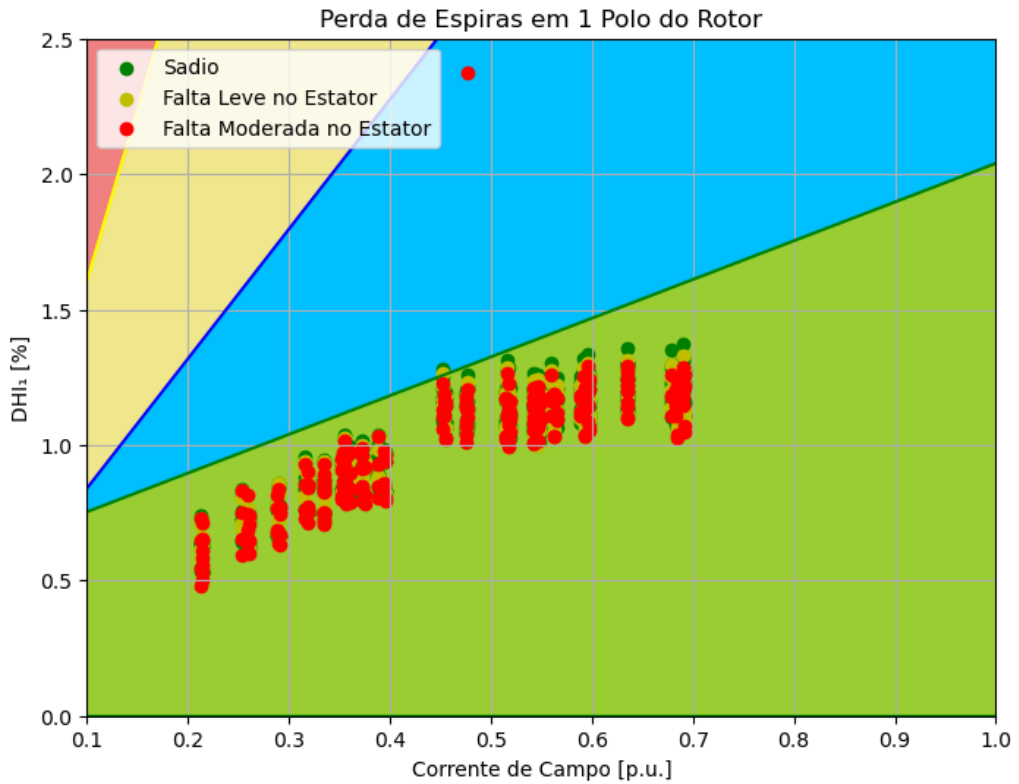
A Figura 79 apresenta o diagrama de detecção de perda de espiras em um polo do rotor, porém agora empregando pontos sádios e com falta leve e moderada no estator (nas 3 fases). Observa-se que um único ponto de cada condição (sadio, falta leve e falta moderada) atravessa a linha que delimita a condição normal, ou seja, apenas um sensor é sensibilizado em cada caso. Porém, isso não quer dizer que o método é incapaz de diferenciar os dois tipos de defeito, pois na subseção 5.2 foi ressaltado que as informações provenientes dos quatro sensores devem ser coincidentes (isto é, os quatro sensores serem sensibilizados ao mesmo tempo de maneira semelhante). Então, o método de detecção é capaz de diferenciar a perda de espiras no enrolamento de excitação do de perda no enrolamento de armadura.

Figura 78 – Diferenciação de perda de espiras no rotor de excentricidade estática
Perda de Espiras em 1 Polo do Rotor



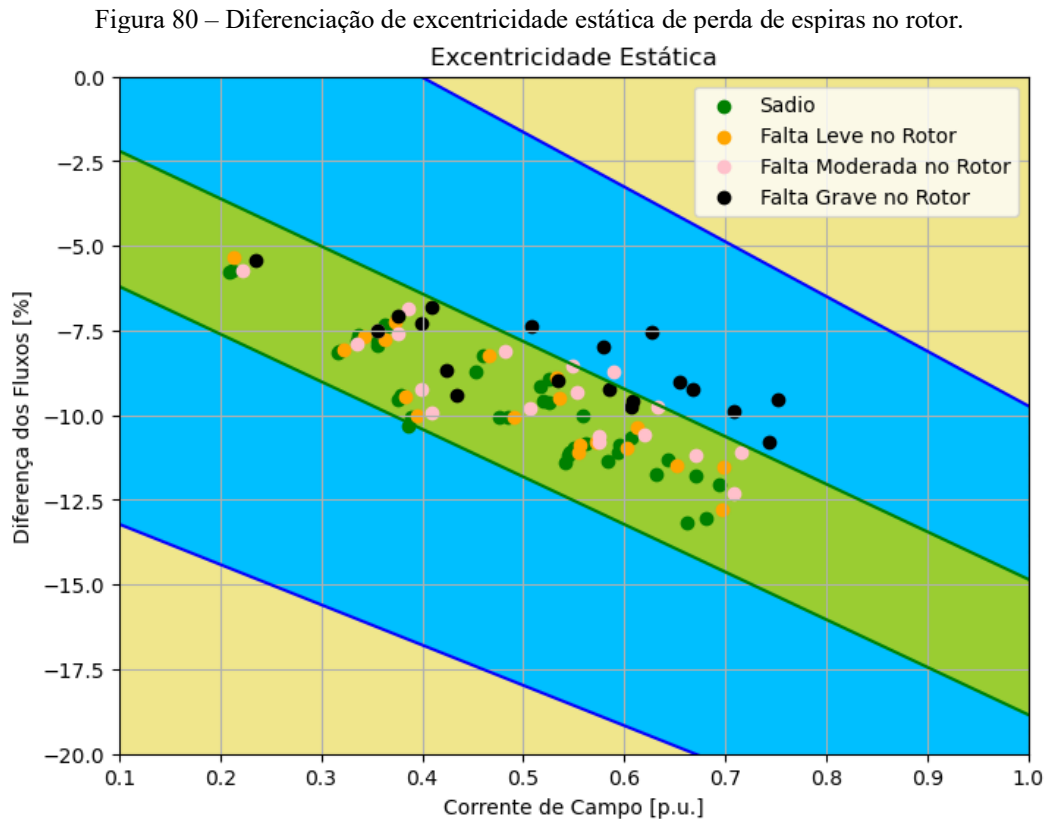
Fonte: Autor.

Figura 79 – Diferenciação de perda de espiras no rotor de perda de espiras no estator.



Fonte: Autor.

A Figura 80 mostra o diagrama de detecção de excentricidade estática com o emprego de pontos sadios e com falta leve, moderada e grave no enrolamento de excitação.

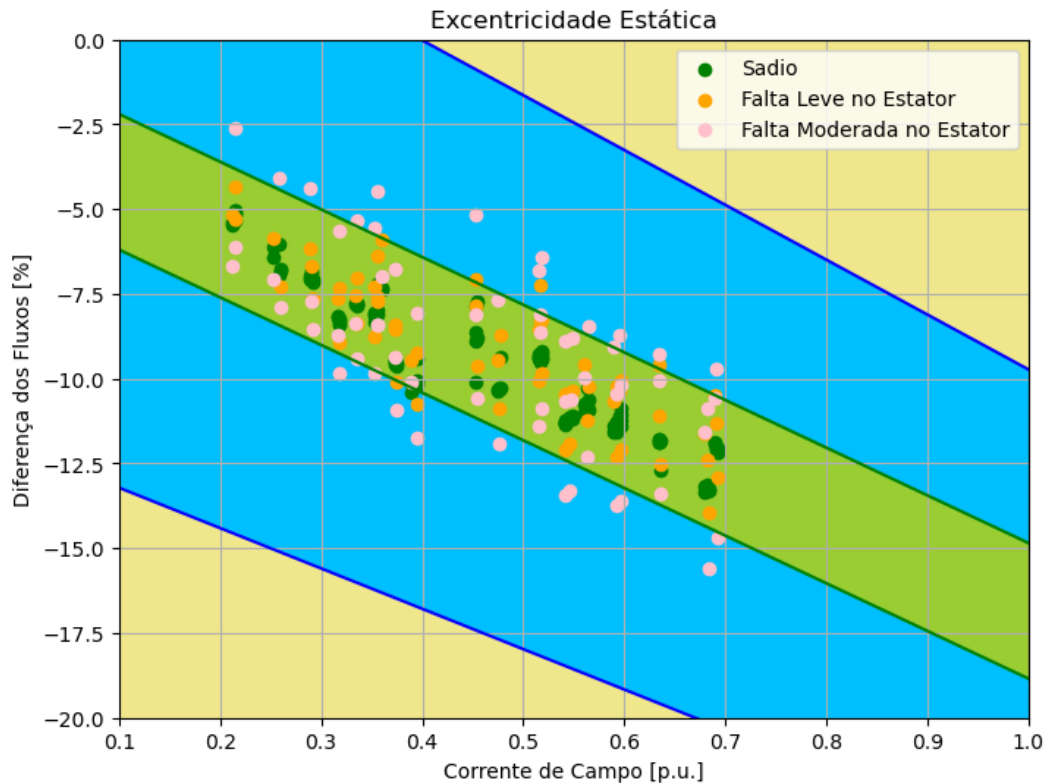


Fonte: Autor.

Observa-se que no resultado apresentado na Figura 80 alguns pontos de falta moderada e grave no enrolamento de excitação avançam para a região de “Deslocamento Desigual < 25%” do diagrama de detecção de excentricidade estática. Uma maneira de resolver isso seria analisar hierárquica e primeiramente o diagrama de detecção de perda de espiras no enrolamento de excitação (Figura 54), pois nele o estado estaria em “Perda entre 50-100%”, e posteriormente este diagrama. Dessa maneira, o sistema de monitoramento indicaria que há uma alta probabilidade de defeito no enrolamento de excitação e uma baixa probabilidade da presença de uma excentricidade estática leve.

A Figura 81 apresenta o diagrama de detecção de excentricidade estática com a utilização de pontos sadios e com falta leve e moderada no estator (nas 3 fases).

Figura 81 – Diferenciação entre excentricidade estática e perda de espiras no estator.



Fonte: Autor.

Nota-se que vários pontos de falta moderada no estator estão fora da região de normalidade no eixo do gerador (região verde). Uma solução seria alargar a zona de condição normal de operação, o que resultaria também em perda de sensibilidade da estratégia.

Devido ao fato de que não foi possível a construção de um diagrama de detecção para a falta de perda de espiras no enrolamento de armadura, não serão empregados os pontos experimentais das demais faltas para este caso.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesse capítulo, foram empregados os dados experimentais nas estratégias de detecção de defeito propostas. Para as três faltas estudadas, mostrou-se que o emprego da corrente de excitação pode auxiliar na segregação da ocorrência de uma falta de uma alteração do ponto de operação.

A distorção harmônica individual da componente de giro mecânico (DHI_1) do espectro em frequência do fluxo magnético de entreferro se mostrou ser um indicador eficaz para realizar a quantificação e a detecção da perda de espiras em um polo do rotor. Com esse indicador, aliado ao emprego de valores da corrente de excitação, construiu-se um diagrama de detecção

para esse defeito que apresenta robustez, pois com a utilização de ao menos dois sensores (vide Figura 76), as análises não apresentaram falsos-positivos.

Para a detecção de excentricidade estática em um único eixo, foi proposto o monitoramento da diferença dos fluxos medidos por sensores defasados de 180° na circunferência interna do estator em função da corrente de campo. A potencialidade da estratégia foi demonstrada com a utilização dos sensores disponibilizados na bancada de testes (defasados de 170°). Os resultados mostram que o método é capaz de realizar a detecção e mensuração do nível de excentricidade estática do rotor, inclusive para casos em que o eixo do rotor apresenta deslocamentos opostos nos dois lados. O método apresentou certa sensibilidade de detecção indesejável nas condições de falta grave no enrolamento de excitação e de falta moderada no enrolamento de armadura, impossibilitando a diferenciação assertiva entre as faltas. Em ambos os casos, uma solução seria alargar a região de condição normal, porém com o custo de perda de sensibilidade de detecção de anomalias em seus estados iniciais.

Na detecção do defeito de perda de espiras no enrolamento de armadura, mostrou-se que diversas DHIs são sensibilizadas. Contudo, elas apresentam uma variação relativamente baixa quando comparadas à DHI_1 no caso de detecção de perda de espiras no enrolamento de campo. Apesar dos valores da corrente de excitação apresentarem uma boa correlação com as DHIs, não foi possível a construção de um diagrama de detecção para esta falta.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Na revisão bibliográfica realizada, a maioria dos trabalhos de detecção de faltas são para motores de indução trifásicos. Percebeu-se que o tema de monitoramento de condição de geradores síncronos está sendo estudado na atualidade e possui muitas lacunas a serem exploradas. Foram discutidos neste presente trabalho os principais equipamentos comerciais para o monitoramento de geradores síncronos, como o Flux TracII-S da Iris Power, através do fluxo magnético interno, e o VibraOne da AQTech, através da vibração mecânica. No estudo bibliográfico, observou-se, para motores de indução, que defeitos nos enrolamentos de excitação e de armadura compõem entre 40% a 50% das ocorrências de falta, e outros 40% são defeitos no rolamento. Por essa razão, o presente trabalho explorou estratégias para detecção das faltas de perda de espiras (em ambos os enrolamentos) e do defeito de excentricidade estática (por se tratar de um defeito no rolamento de possível imposição na bancada de testes). Após o estudo e aperfeiçoamento na utilização da bancada de testes presente no LABMAQ da UFSC, desenvolveu-se um novo equipamento de medição e condicionamento de sinais para utilização não só neste trabalho, mas também em estudos futuros a serem realizados no GRUCAD.

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento e aplicação de estratégias de detecção de faltas incipientes em geradores síncronos através da medição do fluxo magnético de entreferro. Com a utilização da técnica de históricos de amplitude em conjunto com os indicadores propostos, demonstrou-se a possibilidade de se detectar, diferenciar e mensurar o nível dos defeitos estudados com ensaios desenvolvidos em uma única máquina. Porém, há indícios de que a metodologia pode ser aplicada em outras máquinas de diferentes números de polos (maiores que 2), potências, formas construtivas etc. Além disso, foi possível segregar alterações ocasionadas pela mudança do ponto de operação da máquina de alterações provocadas por faltas incipientes através do monitoramento e da agregação dos valores da corrente de campo do GS como variável de análise.

A detecção do defeito de perda de espiras em um polo do rotor é tradicionalmente realizada pelo monitoramento de assimetrias na forma de onda do fluxo magnético de entreferro, ou seja, no domínio do tempo. Neste trabalho apresentou-se uma abordagem inovadora no domínio da frequência que utiliza o indicador de distorção harmônica individual da frequência de rotação em relação à frequência fundamental elétrica (DHI_1) do gerador. Este indicador, junto com a corrente de excitação da máquina, permitiu a construção de um diagrama de detecção capaz também de mensurar a gravidade do defeito, independentemente do

carregamento do GS. Observou-se que esta estratégia pode ser aplicada com um único sensor. Adicionalmente, a presença de mais transdutores aumenta a confiabilidade do método. Para os dados experimentais coletados, a utilização do método proposto com pelo menos dois sensores levou a análises que não apresentaram falsos-positivos.

A excentricidade estática é mais comumente detectada através de sistemas que monitoram a vibração mecânica da máquina, pois o defeito é de origem mecânica (desalinhamento do eixo). Como é conhecido, os métodos que utilizam essa grandeza apresentam resultados positivos. Mas, eles possuem dificuldade de discernir a direção de deslocamento do eixo caso não empreguem sensores adicionais, tais como proximímetros. A estratégia proposta neste trabalho seria a utilização de quatro sensores defasados de 90° na circunferência interna do estator para dividir a máquina em dois eixos ortogonais (por exemplo, vertical e horizontal). Através da medição da diferença dos fluxos em cada um desses eixos, seria realizada não só a detecção do defeito, mas também a mensuração da gravidade do defeito e a determinação da direção e do sentido do deslocamento. Esta potencialidade foi demonstrada com os sensores disponibilizados na configuração da bancada. Nesta metodologia, também se utilizou os valores de corrente de campo para segregar a falta do ponto de operação do GS. A fim de se averiguar se outros tipos de defeitos estudados sensibilizassem a detecção com esta estratégia, empregou-se os dados experimentais com os outros defeitos nesta técnica e se notou que a ocorrência em estágios mais graves de perda de espiras no enrolamento de excitação e no de armadura pode ocasionar uma sensibilização no método proposto. Porém, para os casos estudados (vide Figura 80 e Figura 81), a sensibilização apresentada foi de que o gerador estivesse próximo ao estado sadio. Assim, há indícios de que se possa diferenciar os tipos faltas, pois os defeitos nos enrolamentos da máquina sensibilizaram em menor grau a estratégia aplicada para detectar a excentricidade estática. O problema pode ser contornado através da utilização de um terceiro indicador, como por exemplo a DHI_1 para defeitos no enrolamento de excitação ou, como propõe Doorwar (2019), a corrente de sequência negativa para o enrolamento de armadura, o que não foi investigado neste trabalho.

O estudo realizado neste trabalho para detecção de perda de espiras no enrolamento de armadura mostrou a correlação de várias DHIs do fluxo magnético interno do gerador com a corrente de excitação, a qual poderia ajudar a segregar o defeito de uma mudança do carregamento da máquina. Foram avaliadas e analisadas várias DHIs, não relatadas neste presente trabalho, pois escolheu-se neste estágio inicial da investigação aquelas que apresentaram maior sensibilidade aos defeitos estudados. Porém, mesmo utilizando a DHI_3 , a

que se mostrou mais sensibilizada com o agravamento da falta, não foi possível detectar este defeito em seus estágios iniciais.

O objetivo principal desta dissertação foi alcançado. Para os defeitos de perda de espiras no enrolamento de excitação e de excentricidade estática construiu-se diagramas de monitoramento robustos, insensíveis aos efeitos de alteração do carregamento do gerador. Para a detecção do defeito de perda de espiras na armadura, contribuiu-se com a estratégia proposta de maneira inovadora.

Em relação a trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes em outros geradores síncronos para comprovar se os diagramas de monitoramento propostos são tão eficazes como se apresentaram na máquina estudada. Outra possibilidade de estudo é verificar se outras grandezas elétricas do gerador possuem uma correlação maior do que a corrente de campo nas DHIs do fluxo magnético interno, como também expandir as estratégias para outros tipos de defeito, tais como curto-circuito de lâminas no núcleo e excentricidade dinâmica.

Esta dissertação de mestrado foi motivada e parcialmente custeada no âmbito do programa de P&D ANEEL e desenvolvida no programa de P&D da Engie Brasil Energia e Itá Energética S.A., no projeto PD-00403-0048/2019, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A. O CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) também custeou este trabalho.

REFERÊNCIAS

ALBRIGHT, D.. Interturn Short-Circuit Detector for Turbine-Generator Rotor Windings. **IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems**, [S.L.], v. -90, n. 2, p. 478-483, mar. 1971. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpas.1971.293048>

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. 3. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2004.

BONNETT, Austin H.; GLATT, Helmut M.. Ten Things You Should Know About Electric Motors: their installation, operation, and maintenance. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 25-36, nov. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mias.2017.2740456>.

BOSSIO, G. R.; ANGELO, C. H. de; LABARRERA, P. M. de; SOLSONA, J. A.; GARCIA, G. O.; VALLA, M. I.. Stator winding fault detection in induction motor drives using signal injection. **8Th IEEE Symposium On Diagnostics For Electrical Machines, Power Electronics & Drives**, [S.L.] set. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/demped.2011.6063607>.

BRITO, J; FILHO P. L; PEDERIVA, R. Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de corrente e análise de fluxo magnético. **X Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamentos**, 2001.

DOORWAR, Ashish; BHALJA, Bhavesh; MALIK, Om P.. A New Internal Fault Detection and Classification Technique for Synchronous Generator. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 739-749, abr. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwr.2018.2879686>.

EHYA, Hossein; NYSVEEN, Arne. Pattern Recognition of Interturn Short Circuit Fault in a Synchronous Generator Using Magnetic Flux. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 57, n. 4, p. 3573-3581, jul. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2021.3072881>.

ENERGÉTICA, Empresa de Pesquisa. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 10 jul. 2022.

EQUACIONAL, Elétrica e Mecânica. **Manual geral de instruções: Grupo gerador especial**. 2014.

FALCONE, Aurio Gilberto. **Eletromecânica Volume 2**. 4ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2002.

FILIPPETTI, F.; FRANCESCHINI, G.; TASSONI, C.. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults. **Conference Record Of The 1993 Ieee Industry Applications Conference Twenty-Eighth Ias Annual Meeting**, [S.L.], out. 1998. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ias.1993.298942>.

FITZGERALD, KINGSLEY Jr., STEPHEN, D. Umans. **Máquinas Elétricas**. 7ª ed. Porto Alegre: Editora McGraw-Hill, 2014.

FISER, Rastko; MAKUC, Danilo; LAVRIC, Henrik; MILJAVEC, Damijan; BUGEZA, Miroslav. Modeling, analysis and detection of rotor field winding faults in synchronous generators. **The XIX International Conference On Electrical Machines - ICEM 2010**, [S.L.], set. 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icelmach.2010.5608042>.

FREITAS, L. M; GOMES, L. K. C. R; BATISTELA, N. J; SOUZA, R. S; SADOWSKI, N; SANTOS, H. F; NASCIMENTO, R. J; MUNARETTI, A. H. Emprego de Nova Técnica na Detecção de Falta Incipiente em Gerador Síncrono através do Campo Magnético Externado. **XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Belo Horizonte, 2019.

FROSINI, Lucia. Novel Diagnostic Techniques for Rotating Electrical Machines—A Review. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 19, p. 5066, 27 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13195066>.

GRILLO, Luis O. S.; WENGERKIEVICZ, Carlos A. C.; BATISTELA, Nelson J.; KUO-PENG, Patrick; FREITAS, Luciano M. de. A Method for Statistical Processing of Magnetic Field Sensor Signals for Non-Invasive Condition Monitoring of Synchronous Generators. **Sensors**, [S.L.], v. 22, n. 22, p. 8631, 9 nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22228631>.

GRUBIC, S.; ALLER, J.M.; LU, Bin; HABETLER, T.G.. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, [S.L.], v. 55, n. 12, p. 4127-4136, dez. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tie.2008.2004665>.

GUIMARÃES, C. H. C; RANGEL, R. D. Diagramas Operacionais de Unidades Geradoras. **X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**, Florianópolis, 2006.

HESSMANN, Gabriel Piazero. **Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada**. 2018. 125 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

IAMAMURA, B. A. T.; MENACH, Y. Le; TOUNZI, A.; SADOWSKI, N.; GUILLOT, E.. Study of Static and Dynamic Eccentricities of a Synchronous Generator Using 3-D FEM. **IEEE Transactions On Magnetics**, [S.L.], v. 46, n. 8, p. 3516-3519, ago. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tmag.2010.2043347>.

IAMAMURA, B. A. T.; MENACH, Y. Le; TOUNZI, A.; SADOWSKI, N.; GUILLOT, E.. Study of interturn short circuit in rotor windings of a synchronous generator using FEM. **Digests Of The 2010 14Th Biennial IEEE Conference On Electromagnetic Field Computation**, [S.L.], maio 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cefc.2010.5481857>.

IAMAMURA, Bruno Akihiro Tanno. **Contribuição à detecção de defeitos nos rotores de turboalternadores**. 2011. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

POWER, Iris. **ROTOR FLUX MONITORING (SYNCHRONOUS MACHINES)**. Disponível em: <https://irispower.com/monitoring/rotor-flux-monitoring/?assetId=73>. <https://irispower.com/monitoring/mechanical-vibration-monitoring/?assetId=73>. Acesso em: 12 maio 2023.

KUTT, Filip; MICHNA, Michał; KOSTRO, Grzegorz. Non-Salient Brushless Synchronous Generator Main Exciter Design for More Electric Aircraft. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 2696, 27 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13112696>.

LAMIM FILHO, P.C.M.; PEDERIVA, R.; BRITO, J.N.. Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [S.L.], v. 42, n. 1-2, p. 377-387, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.08.033>.

LAWRENCE, Roger; ZIMMER, David. Mitigating Mechanical Failures in ASD-Driven Equipment: proven methods. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 48-56, nov. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mias.2015.2459092>.

MIRIMANI, Seyyed Mehdi; VAHEDI, Abolfazl; MARIGNETTI, Fabrizio; SANTIS, Enzo de. Static Eccentricity Fault Detection in Single-Stator–Single-Rotor Axial-Flux Permanent-Magnet Machines. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 48, n. 6, p. 1838-1845, nov. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2012.2221673>.

MISTRY, Rajendra; MAYNUS, Ryan. Crucial for Rotating Machines: types and properties of lubricants and proper lubrication methods. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 10-18, nov. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mias.2015.2459101>.

NADARAJAN, Sivakumar; WANG, Rui; GUPTA, Amit Kumar; PANDA, Sanjib Kumar. Vibration signature analysis of stator winding fault diagnosis in brushless synchronous generators. **2015 IEEE International Transportation Electrification Conference (Itec)**, [S.L.], ago. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/itec-india.2015.7386919>.

RAMS, W.; RAD, M.. System for core fault detection of AC electric machines, based on magnetic field scanning. **2014 International Conference On Electrical Machines (ICEM)**, [S.L.], set. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icelmach.2014.6960406>.

RIGONI, Mauricio. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo**. 2014. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SADEGHI, Iman; EHYA, Hossein; FAIZ, Jawad. Analytic method for eccentricity fault diagnosis in salient-pole synchronous generators. **2017 International Conference On Optimization Of Electrical And Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference On Electrical Machines And Power Electronics (ACEMP)**, [S.L.], maio 2017. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/optim.2017.7974981>.

SAHRAOUI, M.; GHOGGAL, A.; ZOUZOU, S. E.; ABOUBOU, A.; RAZIK, H.. Modelling and Detection of Inter-Turn Short Circuits in Stator Windings of Induction Motor. **IECON 2006 - 32Nd Annual Conference On IEEE Industrial Electronics**, [S.L.], nov. 2006. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/iecon.2006.348093>.

SANTOS, Helton Fernando dos. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, H. F. dos; RIGONI, M.; ELIAS, R. de A.; FELER, L. A.; WENGERKIEVICZ, C. A. C.; BATISTELA, N. J.; SADOWSKI, N.; KUO-PENG, P.; BASTOS, J. P. A.; FREITAS, L. M. de. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. **Journal Of Microwaves, Optoelectronics And Electromagnetic Applications**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 70-89, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1872>.

SANTOS, Helton Fernando dos. **Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo**. 2021. 166 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SHAIKH, Muhammad Faizan; KIM, Han-Ju; LEE, Sang Bin; LIM, Chaewoong. Online Airgap Flux Based Diagnosis of Rotor Eccentricity and Field Winding Turn Insulation Faults in Synchronous Generators. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 359-366, mar. 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tec.2021.3092198>.

SHUTING W; ZHAOFENG X; YONGGANG L; ZILI H; HEMING L. Analysis of generator vibration characteristic on rotor winding interturn short circuit fault. **Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems**, vol.2, pp. 882-885, Beijing, China, 2003

SILVA, A. M. **Induction motor fault diagnostic and monitoring methods**. Dissertação de mestrado, Marquette University, 2006.

SINGH, G.K; KAZAZ, Sa'Ad Ahmed Saleh Al. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research-a survey. **Electric Power Systems Research**, [S.L.], v. 64, n. 2, p. 145-158, fev. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7796\(02\)00172-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7796(02)00172-4).

SKF. **Sensores de Vibração**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/condition-monitoring-systems/sensors/vibration-sensors>. Acesso em: 12 maio 2023.

STONE, Greg C.; SASIC, Mladen; STEIN, Jan; STINSON, Chris. Using magnetic flux monitoring to detect synchronous machine rotor winding shorts. **2011 Record Of Conference Papers Industry Applications Society 58Th Annual Ieee Petroleum And Chemical Industry Conference (PCIC)**, [S.L.], set. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pcicon.2011.6085862>.

TAVNER, P.J.. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. **Iet Electric Power Applications**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 215, 2008. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa:20070280>.

UEMORI, M; ALVES E. L; SPIRIDON M. **Stator Core and Winding Repair Alternatives after a Fault with Significant Damage**. Hydro Review, 2020. Disponível em: <https://www.hydroreview.com/technology-and-equipment/hydro-review-stator-core-and-winding-repair-alternatives-after-a-fault-with-significant-damage/#gref>. Acesso em: 11/05/2023.

VITEK O; HAJEK V. **External magnetic field analysis of induction motor**. Publicação interna, Universidade de Brno, República Tcheca, 2004.

YAGHOBI H; ANSARI K; MASHHADI H. R. Stator turn-to-turn fault detection of synchronous generator using total harmonic distortion (THD) analyzing of magnetic flux linkage. **IJST, Transactions of Electrical Engineering**, vol. 37, n. 2, pp 161-182, Irã, 2013.

YUN, Jangho; LEE, Sang Bin; SASIC, Mladen; STONE, Greg C.. Reliable Flux-Based Detection of Field Winding Failures for Salient Pole Synchronous Generators. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 1715-1718, set. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tec.2019.2917622>.

WEG. **Danos em enrolamentos – Motores trifásicos**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0b/hbf/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 26/05/2023.